רון הדר

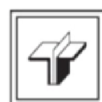
מיקוד 2022

פיזיקה

חשמל

הכנה ותרגול לבגרות

שאלון מספר 036371



רכס
פרויקטים חינוכיים בע"מ

מיקוד בפיזיקה
חשמל

רון הדר

הכנה ותרגול לבגרות

שאלון מספר 036371

קרא והעיר: שוקי זכאי

Printed in Israel 2021

רכס פרויקטים חינוכיים בע"מ
ת"ד 324 קדימה 6092000
טלפון 073-2550000 פקס. 073-2550055
כתובתנו באינטרנט: www.reches.co.il
E-mail: main@reches.co.il

מסת"ב ISBN 978-965-558-485-1

תוכן העניינים

פתח דבר

לתלמידים ולמורים

ספר זה מיועד לתלמידי פיזיקה אינטרניים ואקסטרניים, המתכוננים לגשת לבחינת הבגרות **בחשמל**, שאלון מספר 036371, וכן למורים הזקוקים למאגר של בחינות מתכונת מעודכנות.

הספר מעודכן לתוכנית הלימודים של משרד החינוך בהתאם למבנה הבחינה לקיץ 2022. וכולל את עיקרי חומר הלימוד לפי הפרקים השונים, כולל דוגמאות והסברים. כמו כן בספר 14 בחינות מתכונת מעודכנות, על פי חוזר המפמר מאוגוסט 2021. לכל אחת מהשאלות שבבחינות המתכונת ניתן פתרון מלא ומנומק בהתאם לדרישות הפיקוח על הוראת הפיזיקה ובהתאם למחוונים של הערכת הבחינות בשנים האחרונות.

השאלות כוללות את כל רמות החשיבה הנדרשות מהתלמידים, החל ברמה של ידע וכלה ברמות חשיבה והבנה גבוהות. רוב השאלות מתאפיינות ברמת קושי מדורגת מהקלה לקשה. השאלות שבבחינות נכתבו במהלך השנים הרבות שבהן כתבתי בחינות לתלמידיי, ושופרו במשך השנים בעקבות בדיקת התשובות של התלמידים.

תודות:

- לצוות של רכס על התמיכה ועל הליווי.
- לשוקי זכאי על הערותיו החכמות.
- לאשתי מיכל ולילדיי על הסבלנות.
- לתלמידיי במשך השנים שמהם למדתי יותר מכולם.

רון הדר

מיפוי שאלות לפי נושא

אלקטרוסטטיקה																				
	ללא אנרגיה			כולל אנרגיה																
מבחן	1	3	8	2	4	5	6	7	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14
שאלה	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

מעגלי זרם ישר														
מבחן	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
שאלה	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3

מעגלי זרם ישר													
מבחן	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	14	14
שאלה	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	2	3

שדה מגנטי																	
	שדה מגנטי							הכוח על מטען בשדה מגנטי									
מבחן	2	4	5	6	12	13	14	1	3	5	6	7	8	9	10	13	14
שאלה	5	4	4	5	5	4	4	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5

שדה מגנטי						
	כוח מגנטי על תיל נושא זרם					
מבחן	1	2	3	4	7	11
שאלה	4	4	5	5	4	5

השראה אלקטרומגנטית														
מבחן	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
שאלה	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

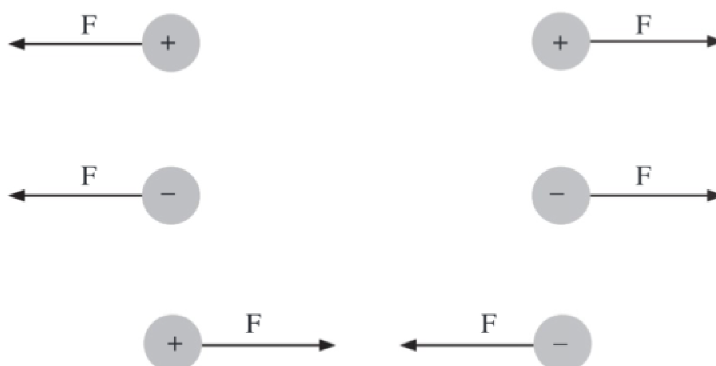
פרק 1 – חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

הכוח החשמלי – חוק קולון

מטען חשמלי הוא התכונה שיש לגוף או לחלקיק, המאפשרת השתתפות באינטראקציה החשמלית. קיימים שני סוגים של מטען חשמלי: מטען חיובי ומטען שלילי. יחידת המטען החשמלי היא קולון ומסומנת באות C.

הכוח החשמלי הוא כוח הפועל בין כל שני גופים הטעונים במטענים חשמליים. בין גופים הטעונים מטענים בעלי סימן זהה פועלים כוחות דחייה, ובין גופים הטעונים מטענים בעלי סימנים מנוגדים פועלים כוחות משיכה.

את גודל הכוח אפשר לחשב בנוסחה הידועה כחוק קולון:



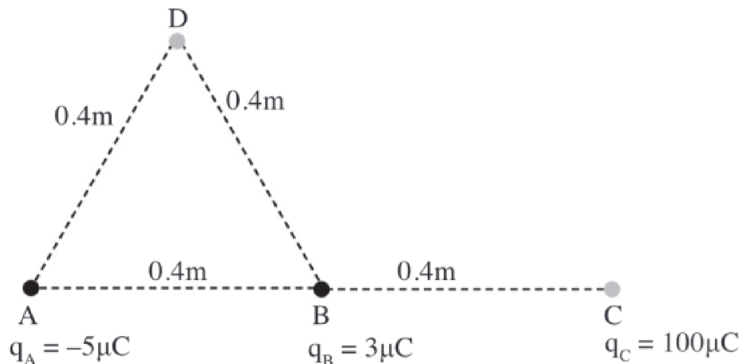
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

כאשר:

- F – גודל הכוח החשמלי בניוטונים (N).
- q_1 , q_2 – שני המטענים החשמליים בקולונים (C).
- r – המרחק בין שני המטענים במטרים (m) (אם שני הגופים הטעונים הם כדורים, המרחק נמדד בין שני מרכזי הכדורים).
- k – הקבוע האלקטרוסטטי שערכו $k = 9\cdot10^9 \frac{N\cdot m^2}{C^2}$

שאלה לדוגמה:

בנקודות A ו-B ניצבים שני מטענים, $q_A = -5\mu C$ ו $q_B = 3\mu C$, בהתאמה. המרחקים נתונים בתרשים שלפניכם (הסימן μ, מיקרו, מייצג מיליונית, כלומר $\mu C = 10^{-6} C$):



1. מה הכוח השקול שיפעל על מטען שלישי $q_C = 100\mu C$ הניצב בנקודה C, ונמצאת על המשך הקטע AB?
2. מה הכוח השקול שיפעל על המטען השלישי, אם הוא יעבור לנקודה D שנמצאת במרחקים שווים מ-A ומ-B?

הפתרון:

שיטת הפתרון המומלצת: תחילה, יש לקבוע את כיווני הכוחות לפי סימני המטענים. לאחר מכן יש לחשב את גודל הכוחות בלי להתייחס לסימנים, ולבסוף לחבר את הווקטורים.

1. על q_C פועלים שני כוחות: F_A – כוח משיכה (כי סימני המטענים מנוגדים) שמאלה, שמפעיל עליו המטען q_A,

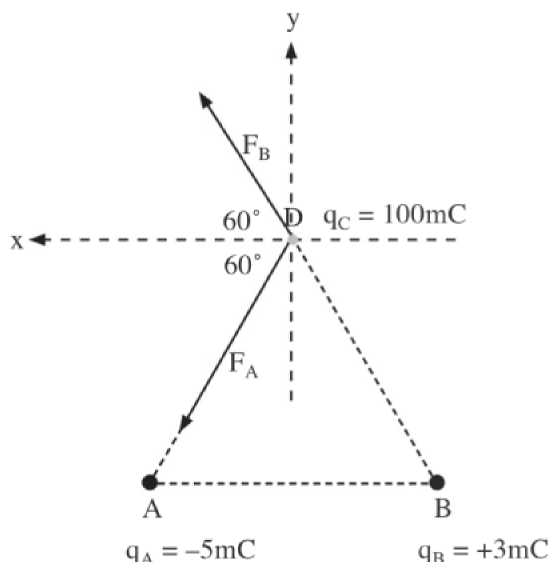
ו- F_B – כוח דחייה (כי סימני המטענים זהים) ימינה, שמפעיל עליו המטען q_B.



$$\Sigma F = |F_B| - |F_A| = \frac{kq_Bq_C}{{r_{BC}}^2} - \frac{kq_Aq_C}{{r_{AC}}^2} = \frac{9\cdot10^9\cdot3\cdot10^{-6}\cdot100\cdot10^{-6}}{0.4^2} - \frac{9\cdot10^9\cdot5\cdot10^{-6}\cdot100\cdot10^{-6}}{0.8^2}$$
$$= 16.88 - 7.03 = 9.85N$$

גודלו של הכוח השקול הוא $9.85N$, וכיוונו ימינה.

2. נוסיף מערכת צירים, ונקבע את כיווני הכוחות:

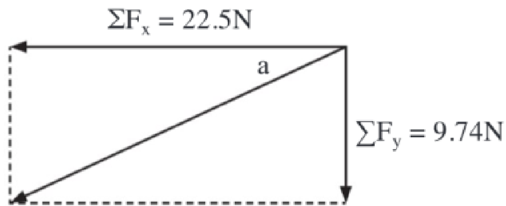


נחשב את רכיבי הכוח השקול:

$$\Sigma F_x = F_{Bx} + F_{Ax} = \frac{kq_Bq_C\cos60°}{{r_{BD}}^2} + \frac{kq_Aq_C\cos60°}{{r_{AD}}^2}$$
$$= \frac{9\cdot10^9\cdot3\cdot10^{-6}\cdot100\cdot10^{-6}\cos60°}{0.4^2} + \frac{9\cdot10^9\cdot5\cdot10^{-6}\cdot100\cdot10^{-6}\cos60°}{0.4^2}$$
$$\Sigma F_y = 8.44 + 14.06 = 22.5N$$

$$\Sigma F_y = F_{By} + F_{Ay} = \frac{kq_Bq_C\sin60°}{{r_{BD}}^2} - \frac{kq_Aq_C\sin60°}{{r_{AD}}^2}$$
$$= \frac{9\cdot10^9\cdot3\cdot10^{-6}\cdot100\cdot10^{-6}\sin60°}{0.4^2} - \frac{9\cdot10^9\cdot5\cdot10^{-6}\cdot100\cdot10^{-6}\sin60°}{0.4^2}$$
$$\Sigma F_y = 14.62 - 24.36 = -9.74N$$

נבנה את וקטור הכוח השקול:



$$\Sigma F = \sqrt{22.5^2 + 9.74^2} = 24.5N$$

$$\tan\alpha = \frac{9.74}{22.5}$$

$$\alpha = 23.4°$$

גודל הכוח השקול הוא 24.5N, וכיוונו $23.4°$ יחסית לכיוון החיובי של ציר x.

השדה החשמלי

רעיון השדה החשמלי פותח כדי להסביר כיצד הכוח החשמלי בין שני מטענים פועל ממרחק, ללא מגע בין המטענים. המטען הראשון יוצר שדה חשמלי בסביבתו, והמטען השני שנקלע לשדה מושפע ממנו, וההפך, המטען השני יוצר שדה חשמלי בסביבתו והמטען הראשון מושפע ממנו.

מטען q_1 יוצר שדה E_1 בכל נקודה בסביבתו:

q_1 E_1

מטען q_2 מושפע מהשדה E_1, ופועל עליו כוח חשמלי:

A q_1 E_1 q_2

הגדרה: השדה החשמלי בנקודה מסוימת הוא הכוח ליחידת מטען הנמצא בנקודה.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

הגדרה פשוטה יותר: בנקודה מסוימת השדה החשמלי הוא הכוח שיפעל על מטען יחידה (מטען חיובי של +1C) אם הוא יימצא בנקודה זו.

יחידת המידה של שדה חשמלי היא ניוטון לקולון – $\frac{N}{C}$ (בהמשך נראה שיחידת השדה החשמלי גם יכולה להיות וולט למטר – $\frac{V}{m}$).

הכוח הפועל על מטען הנמצא בשדה חשמלי

הכוח הפועל על מטען חשמלי q הנמצא בשדה חשמלי $\vec{E}$ הוא: $\vec{F} = q\vec{E}$

כיוון השדה מוגדר ככיוון הכוח הפועל על מטען חיובי. מכאן נובעת המסקנה:

- אם המטען q חיובי, אז הכוח פועל עם כיוון השדה.
- אם המטען q שלילי, אז הכוח פועל נגד כיוון השדה.

שאלה לדוגמה:

בנקודה P שורר שדה חשמלי $E = 500\frac{N}{C}$ שכיוונו ימינה. מה הכוח שיפעל על אלקטרון שיימצא בנקודה P?

הפתרון:

נמצא את מטען האלקטרון בנוסחאון: $q_e = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} C$.

נחשב את הכוח:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$
$$\vec{F} = -e\vec{E} = -1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 500 = -8 \cdot 10^{-17} N$$

משמעות סימן המינוס היא שכיוון הכוח מנוגד לכיוון השדה, לכן גודל הכוח הוא $8 \cdot 10^{-17} N$ וכיוונו שמאלה.

שדה חשמלי שיוצר מטען נקודתי

גודל השדה החשמלי שיוצר מטען נקודתי בנקודה מסוימת הוא:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

כאשר:

k – הקבוע האלקטרוסטטי.

q – המטען הנקודתי בקולון.

r – מרחק הנקודה המסוימת מהמטען במטרים.

E – גודל השדה החשמלי ב– $\frac{N}{C}$.

כיוון השדה החשמלי שיוצר מטען חיובי הוא מהמטען החוצה. כיוון השדה החשמלי שיוצר מטען שלילי הוא כלפי המטען. כדי להיזכר בכיוונים, חושבים מה יהיה כיוון הכוח, משיכה או דחייה, שיפעל על מטען חיובי שיוצב בנקודה מסוימת. ראו בתרשים שלפניכם:



שדה חשמלי מחוץ לגוף כדורי טעון

השדה מחוץ לגוף כדורי טעון הוא כאילו כל מטען הגוף היה מרוכז במרכזו כמטען נקודתי. עובדה זו נכונה כאשר המטען מפוזר בכדור באופן סימטרי.

שאלה לדוגמה:

1. מהו השדה שיוצר כדור טעון, שרדיוסו 40 סנטימטרים בנקודה A הנמצאת 10 סנטימטרים מפניו?
   מטען הכדור הוא $q = 1.6 \cdot 10^{-7} C$.
2. מה יהיה הכוח שיפעל על מטען $Q = -6 \cdot 10^{-7} C$ שיימצא בנקודה A?

40 cm
A
10 cm

הפתרון:

1. מכיוון שמטען הכדור חיובי, כיוון השדה הוא ממרכז הכדור החוצה, כלומר ימינה. נמצא את גודל השדה, נזכור שיש להציב בנוסחה את מרחק הנקודה A ממרכז הכדור.

$$r = 40 + 10 = 50cm = 0.5m$$

$$E = \frac{kq}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1.6 \cdot 10^{-7}}{0.5^2} = 5,760 \frac{N}{C}$$

השדה בנקודה A הוא $5,760 \frac{N}{C}$ וכיוונו ימינה.

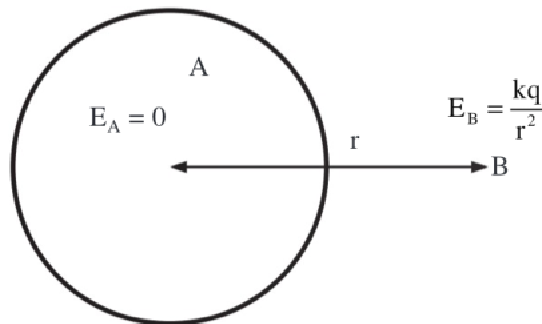
2. המטען Q שלילי, לכן כיוון הכוח הפועל עליו מנוגד לכיוון השדה, כלומר שמאלה. נחשב את גודל הכוח:

$$F = QE = 6 \cdot 10^{-7} \cdot 5,760 = 3.456 \cdot 10^{-3} N$$

הכוח שיפעל על המטען הוא $3.456 \cdot 10^{-3}$ ניוטון.

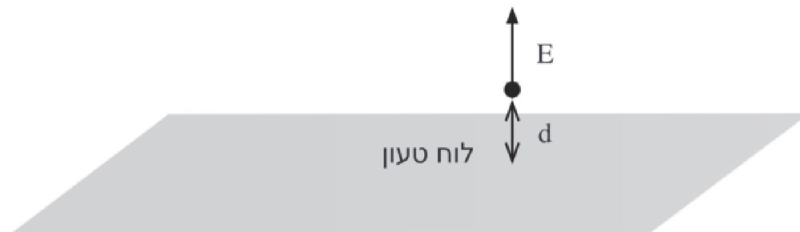
שדה חשמלי של קליפה כדורית טעונה

- השדה מחוץ לקליפה הוא כאילו כל מטען הקליפה היה מרוכז במרכזה (נקודה B).
- השדה בתוך הקליפה הוא 0 (נקודה A).



שדה חשמלי סמוך ללוח מישורי, אינסופי, טעון בצפיפות

מטען אחידה



גודל השדה שיוצר לוח מישורי טעון בצפיפות מטען אחידה σ הוא:

$$E = 2\pi k\sigma$$

כאשר:

σ – צפיפות המטען המשטחית השווה למטען הכולל של הלוח חלקי שטחו – $\sigma = \frac{Q}{A}$ ביחידות של $\frac{C}{m^2}$.

k – הקבוע האלקטרוסטטי.

E – גודל השדה החשמלי ב- $\frac{N}{C}$.

אם הלוח טעון במטען חיובי, אז כיוון השדה הוא מהלוח החוצה, ואם הלוח טעון במטען שלילי, אז כיוון השדה הוא אל הלוח.

ביטוי זה מתקיים בנקודה שמרחקה מהלוח (d בתרשים) קטן מאוד ממרחקה אל הקצה הקרוב של הלוח. בנקודה כזו הלוח נחשב אינסופי.

בנוסחאון מחליפים את הקבוע האלקטרוסטטי k, במקדם הדיאלקטריות של הריק – ε_0, והביטוי לשדה נכתב כך:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \qquad \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$$

מדובר כמובן בגרסה שונה לאותו ביטוי.

אם הביטוי לעיל מבלבל, אפשר ללמוד בעל פה את הנוסחה $E = 2\pi k\sigma$.
נוח לזכור אותה בעזרת ראשי התיבות שפק"ס – **ש**ני **פ**אי **ק**יי **ס**יגמא.

חיבור שדות חשמליים (סופרפוזיציה)

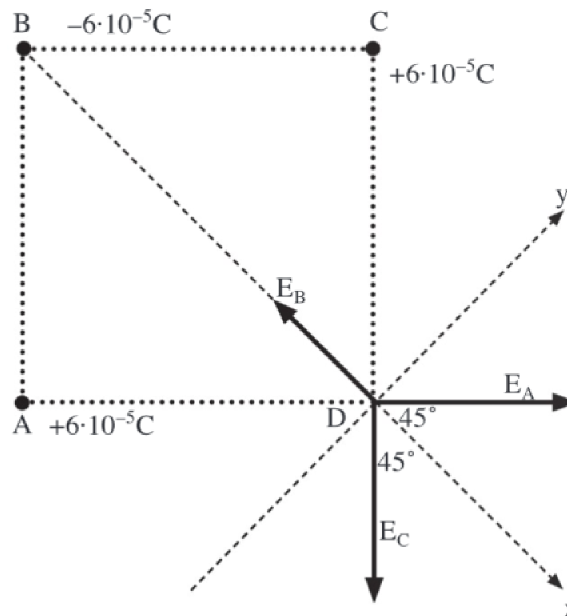
כאשר מספר מטענים יוצרים שדה בנקודה מסוימת, השדה שנוצר באותה נקודה הוא הסכום הווקטורי של השדות שיוצרים המטענים.

שאלה לדוגמה:

בשלושת קודקודיו של ריבוע ABCD, שצלעו 40 סנטימטרים, נמצאים שלושה מטענים:
$q_A = q_C = +6\cdot10^{-5}C$.
$q_B = -6\cdot10^{-5}C$. מצאו את השדה בנקודה D.

הפתרון:

- נשרטט את מערכת המטענים, ונסמן את שלושת השדות.



- נחשב את גודל השדות. מכיוון שאת כיווני השדות כבר קבענו, נחשב את גודלם בערכים מוחלטים:

$$|E_A| = |E_C| = \frac{kq_A}{AB^2} = \frac{9\cdot10^9\cdot6\cdot10^{-5}}{0.4^2} = 3.375\cdot10^6\ \frac{N}{C}$$

$$|E_B| = \frac{k|q_B|}{BD^2} = \frac{9\cdot10^9\cdot6\cdot10^{-5}}{\left(0.4\sqrt{2}\right)^2} = 1.6875\cdot10^6\ \frac{N}{C}$$

- נוסיף מערכת צירים: נבחר בציר ה-x לאורך אלכסון הריבוע (אם מצליחים לנחש את כיוון השדה השקול, כדאי לבחור במערכת הצירים, כך שאחד הצירים בכיוון השקול), ונחשב את רכיבי השדה השקול.

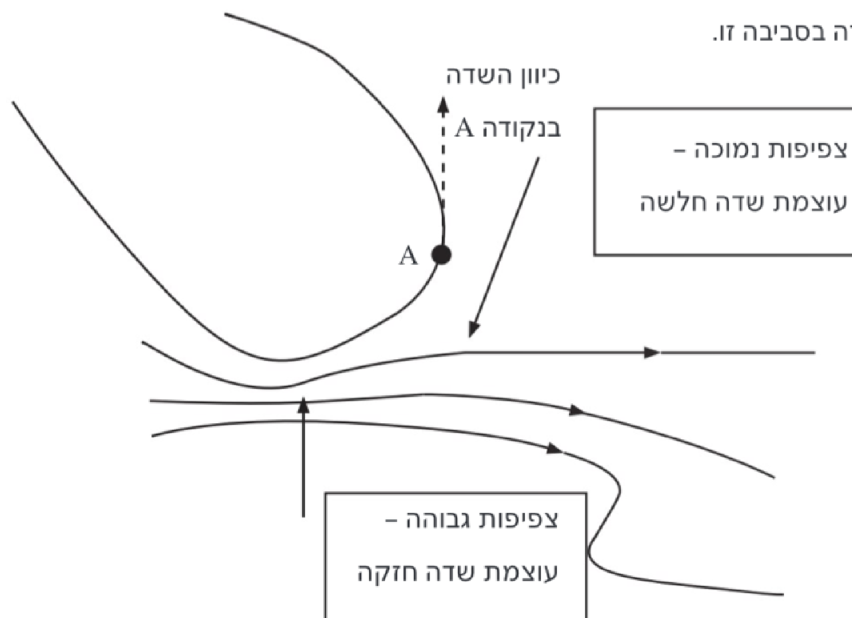
$$\Sigma E_x = E_A\cdot\cos 45° + E_C\cdot\cos 45° - E_B = 2\cdot3.375\cdot10^6\cdot\cos 45° - 1.6875\cdot10^6 = 3.09\cdot10^6\ \frac{N}{C}$$

$$\Sigma E_y = E_A\cdot\sin 45° - E_C\cdot\sin 45° = 0$$

גודל השדה בנקודה D הוא $3.09\cdot10^6\ \frac{N}{C}$, וכיוונו עם כיוון האלכסון BD.

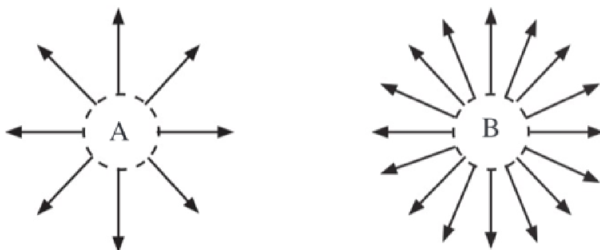
מיפוי שדה חשמלי באמצעות קווי שדה

בעזרת מודל של קווי שדה אפשר לתאר את השדה החשמלי במרחב. הכיוון שאליו פונה קו השדה בנקודה מסוימת, מייצג את כיוון השדה באותה נקודה. צפיפות קווי השדה בסביבה מסוימת מייצגת את עוצמת השדה בסביבה זו.



תכונות קווי השדה החשמלי:

1. קו שדה חשמלי מתחיל במטען חיובי או מאינסוף.
2. קו שדה חשמלי מסתיים במטען שלילי או באינסוף.
3. קווי שדה חשמלי אינם נחתכים.
4. מספר הקווים המתחילים במטען חיובי או מסתיימים במטען שלילי, מייצג את כמות המטען בערכה המוחלט. ראו דוגמה בתרשים שלפניכם: ממטען A יוצאים 8 קווי שדה, וממטען B יוצאים 16 קווי שדה. לכן $q_B = 2q_A$.

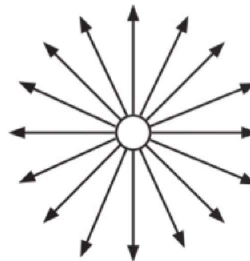


מקרים נפוצים של שדה חשמלי

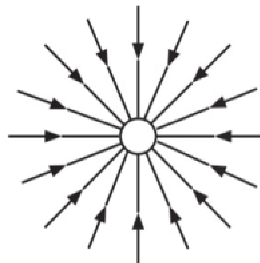
שדה אחיד – קווים ישרים ומקבילים:



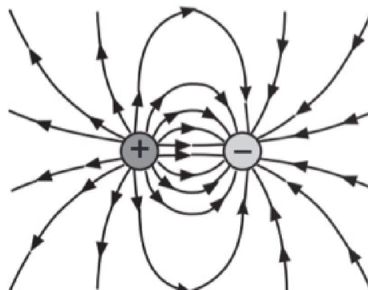
שדה של מטען נקודתי חיובי:



שדה של מטען נקודתי שלילי:



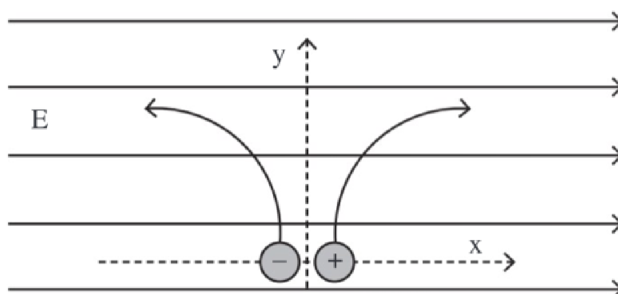
5. שדה של דיפול (זוג מטענים חיובי ושלילי) כאשר שני המטענים שווים בערכם המוחלט.



תנועת גוף טעון בתוך שדה חשמלי אחיד

גוף טעון הנע בהשפעת שדה חשמלי אחיד, נע בתאוצה קבועה בציר המקביל לכיוון השדה (ציר x בתרשים), ובמהירות קבועה בציר המאונך (ציר y בתרשים). תנועה זו דומה לתנועה בשדה כבידה, רק שהכיוון "למטה" הוא עם כיוון השדה למטען חיובי, ונגד כיוון השדה למטען שלילי.

בדוגמה שלפניכם מתוארים מסלולי התנועה של שני חלקיקים, חיובי ושלילי, הנעים בשדה חשמלי אחיד שכיוונו ימינה. לשני החלקיקים ניתנה מהירות התחלתית בכיוון ציר y, והם נעים במסלול פרבולי בדומה לגוף הנזרק אופקית.



השפעת כוח הכובד על תנועת חלקיק (אלקטרון, פרוטון, α) היא זניחה. במקרים שבהם מדובר בגוף בעל מסה ומטען נתונים, יש להשוות את עוצמת כוח הכובד mg לעוצמת הכוח החשמלי qE, ולראות אם כוח הכובד זניח.

שאלה לדוגמה:

יון נתרן $^{23}_{11}Na^{+}$ (ראו מבוא) נע בשדה חשמלי אחיד שגודלו $E = 40{,}000\frac{N}{C}$.

1. חשבו את תאוצת היון.
2. מדוע אפשר להזניח את כוח הכובד הפועל על היון?

הפתרון:

נתונים:

מסת היון: $M = 23U = 23 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} = 3.82 \cdot 10^{-26}\,Kg$.

מטען היון: $q = e = 1.6 \cdot 10^{-19}\,C$.

1. לפי החוק השני של ניוטון:

$$F = ma$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 40{,}000}{3.82 \cdot 10^{-26}} = 1.68 \cdot 10^{11}\,\frac{m}{s^2}$$

תאוצת היון היא: $1.68 \cdot 10^{11}\,\frac{m}{s^2}$.

2. אם נחשיב את כוח הכובד, הוא יתרום לתאוצה תוספת של $10\,\frac{m}{s^2}$. תוספת זניחה בעליל. אפשר גם לחשב את כוח הכובד, ולהראות שהוא זניח יחסית לכוח החשמלי:

$$F_g = mg = 3.82 \cdot 10^{-26} \cdot 10 = 3.82 \cdot 10^{-25}\,N$$

$$F_E = qE = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 40{,}000 = 6.4 \cdot 10^{-15}\,N$$

$$\frac{F_E}{F_g} = \frac{6.4 \cdot 10^{-15}}{3.82 \cdot 10^{-25}} = 1.67 \cdot 10^{10} = 16{,}700{,}000{,}000$$

גודלו של הכוח החשמלי גדול פי 16 מיליארד מכוח הכובד.

מוליכים ומבדדים

- חומר מוליך הוא חומר שחלק מנושאי המטען שבו חופשיים לנוע בהשפעת שדה חשמלי. שתי דוגמאות נפוצות הן:

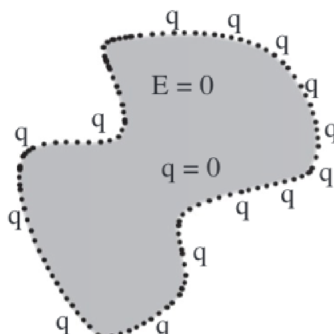
  אלקטרוליט – תמיסה נוזלית המכילה יונים חיוביים ושליליים החופשיים לנוע. אם קיים שדה חשמלי בתמיסה, ינועו היונים החיוביים עם כיוון השדה, והיונים השליליים ינועו נגד כיוון השדה.

  מתכת – במתכת חלק מהאלקטרונים לא קשורים לגרעין אטום מסוים, אלא למתכת כולה. אלקטרונים אלה נקראים **אלקטרונים חופשיים** (או אלקטרוני הולכה). בהשפעת שדה חשמלי ינועו האלקטרונים החופשיים נגד כיוון השדה.

- חומר מבדד הוא חומר שאין בו מטענים חופשיים. אין חומר שהוא מבדד מושלם, לכן רוב המבדדים מאפשרים זרימה איטית מאוד של אלקטרונים.

השדה החשמלי בתוך גוף מוליך ועל פניו

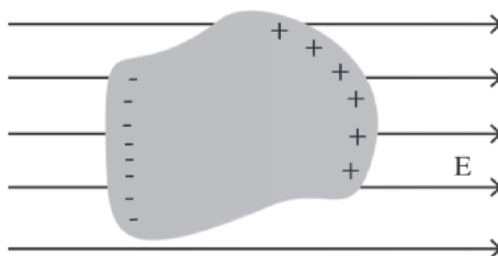
השדה החשמלי **בתוך גוף מוליך** הוא 0, גם אם הגוף טעון, כי אם קיים שדה חשמלי בתוך המוליך, הוא יגרום תנועת אלקטרונים חופשיים, עד אשר השדה יתאפס. השדה **על פני המוליך** יכול להיות שונה מ-0, אבל כיוון השדה בכל נקודה ונקודה חייב להיות מאונך לפני המוליך.



בגוף מוליך טעון, המטען החשמלי כולו נפרס על פני המוליך, כך שפנים הגוף נשאר ניטרלי. ראו בתרשים שלפניכם:

השפעת שדה חשמלי חיצוני על גוף מוליך

גוף מוליך בשדה חשמלי חיצוני יעבור קיטוב, האלקטרונים החופשיים יימשכו נגד כיוון השדה לצדו האחד של הגוף, צד זה ייטען במטען שלילי. בצדו האחר יחסרו אלקטרונים, וצד זה ייטען במטען חיובי. ראו בתרשים שלפניכם:



חשוב לזכור: המטען החיובי לא נוצר ממטענים חיוביים שזרמו ימינה, אלא מחוסר של האלקטרונים שזרמו שמאלה.

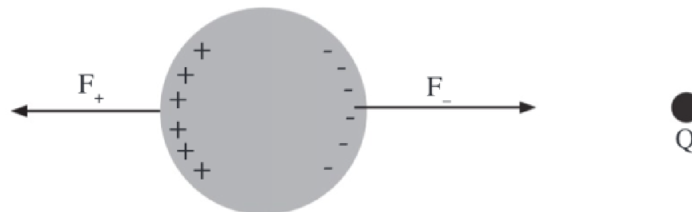
הערה: הגוף הטעון מעקם את קווי השדה. אפקט זה לא נראה בתרשים.

שאלה לדוגמה:

מטען נקודתי חיובי Q, נמצא סמוך לכדור מוליך חסר מטען. האם יפעל כוח בין הגופים?

הפתרון:

לכאורה, לפי חוק קולון, אם אחד הגופים חסר מטען, אז לא יפעל בין הגופים כוח חשמלי. אבל הכדור יעבור קיטוב, כי אלקטרונים חופשיים יימשכו אל המטען Q, ויצטברו על פני הכדור בצדו הקרוב ל-Q.



אלקטרונים אלה יחסרו בצדו הרחוק, והוא ייטען חיובית. הצד השלילי יימשך ל-Q, והצד החיובי יידחה. אבל על אף שהמטענים בשני צדי הכדור שווים בגודלם, הכוחות אינם שווים, כי המרחקים אל Q שונים. הכוח הפועל על צדו הקרוב של הכדור גדול יותר מהכוח הפועל על צדו הרחוק: הכדור יימשך אל המטען הנקודתי.

פרק 2 – אנרגיה פוטנציאלית חשמלית ופוטנציאל חשמלי

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית

הכוח החשמלי הוא כוח משמר.

תזכורת:

כוח משמר הוא כוח שעבודתו אינה תלויה במסלול.

תכונות חשובות של כוח משמר:

1. עבודתו לאורך מסלול סגור (מסלול המתחיל ונגמר באותה נקודה) היא 0.
2. לכוח משמר אפשר לייחס גודל הנקרא אנרגיה פוטנציאלית, לכן קיים מושג של אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית מסומנת ב–U, ונמדדת ביחידות של ג'אול.

מערכת של שני מטענים נקודתיים

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית U, במערכת של שני מטענים נקודתיים q_1, q_2, הנמצאים במרחק r זה מזה, היא העבודה שיש לבצע כדי להביא את המטענים q_1, q_2 מאינסוף (ממרחק רב מאוד זה מזה) למרחק r זה מזה. הנוסחה היא:

$$U = \frac{kq_1q_2}{r}$$

כפי שניכר בביטוי לעיל, האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית מתאפסת כאשר המרחק בין המטענים הוא אינסופי.

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית היא סקלר. אין לה כיוון אלא רק כמות, אבל היא יכולה לקבל ערכים שליליים או חיוביים. לכן בניגוד לחוק קולון, צריך להציב בנוסחה את המטען כולל הסימן. אם שני המטענים הם שווי סימן, אז האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית היא חיובית. אם שני המטענים הם שוני סימן, אז האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית היא שלילית.

מערכת של מספר מטענים נקודתיים

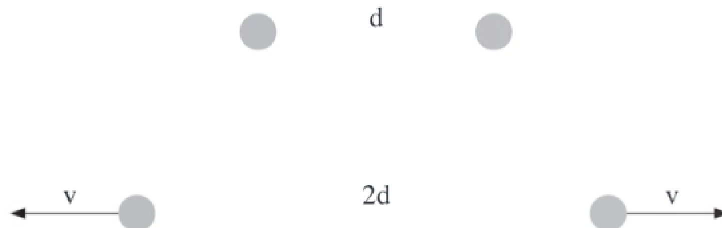
כדי לחשב את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית במערכת של מספר מטענים נקודתיים, יש לחבר את האנרגיה הפוטנציאלית לכל אחד מזוגות המטענים. משמעות התוצאה היא העבודה הדרושה להביא מאינסוף את כל המטענים (יחד, או בזה אחר זה), למקומם במערכת.

לפי חוק שימור האנרגיה, במערכת סגורה של גופים טעונים, שינוי באנרגיה הפוטנציאלית הכוללת מחייב שינוי של האנרגיה הקינטית הכוללת של המערכת, כך שהסכום של האנרגיה הפוטנציאלית הכוללת והאנרגיה הקינטית הכוללת לא משתנה. אם המערכת עוברת ממצב A למצב B, אז מתקיים:

$$U_{(total)}(A)+E_{k(total)}(A)=U_{(total)}(B)+E_{k(total)}(B)$$

שאלות לדוגמה:

1. שני גופים זהים שמסתם m ומטענם q, משוחררים כשהם במרחק d זה מזה. הביעו את גודלה של מהירות הגופים כשיגיעו למרחק של 2d.



לפי חוק שימור התנע, לשני הגופים מהירויות השוות בגודלן ומנוגדות בכיוונן, כדי שהתנע הכולל יישאר 0 כפי שהיה בהתחלה.

הפתרון:

על המערכת לא פועלים כוחות חיצוניים, לכן על פי חוק שימור האנרגיה:

$$U_{(total)}(A)+E_{k(total)}(A)=U_{(total)}(B)+E_{k(total)}(B)$$

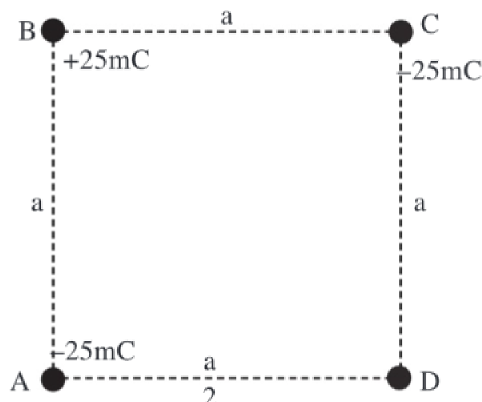
$$\frac{kqq}{d}+0=\frac{kqq}{2d}+2\cdot\frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{kq^2}{d}-\frac{kq^2}{2d}=mv^2$$

$$\frac{kq^2}{2d}=mv^2$$

$$v=\sqrt{\frac{kq^2}{2dm}}$$

2. שלושה מטענים נקודתיים קבועים בשלושה קודקודים של ריבוע, שצלעו $a = 0.05m$, כמתואר בתרשים שלפניכם:



א. מהי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת?

ב. כמה עבודה דרושה כדי להביא מטען נוסף של +25mC מהאינסוף לקודקוד D?

הפתרון:

א. א. נחבר את ערכי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של שלושת זוגות המטענים (נזכור שאורך אלכסון הריבוע הוא $a\sqrt{2}$):

$$U = \frac{kq_Aq_B}{a} + \frac{kq_Bq_C}{a} + \frac{kq_Aq_C}{a\sqrt{2}}$$
$$= \frac{9\cdot10^9\cdot(-25)\cdot10^{-6}\cdot25\cdot10^{-6}}{0.05} + \frac{9\cdot10^9\cdot25\cdot10^{-6}\cdot(-25)\cdot10^{-6}}{0.05} + \frac{9\cdot10^9\cdot(-25)\cdot10^{-6}\cdot(-25)\cdot10^{-6}}{0.05\sqrt{2}}$$
$$= -112.5 - 112.5 + 79.5 = -145.5J$$

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת היא 145.5- ג'אול.

ב. כעת נוצרו שישה זוגות של מטענים – ארבעה זוגות בקודקודים סמוכים ושני זוגות באלכסון. נחשב את האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת:

$$U=\frac{kq_Aq_B}{a}+\frac{kq_Bq_C}{a}+\frac{kq_Cq_D}{a}+\frac{kq_Aq_C}{a\sqrt{2}}+\frac{kq_Bq_D}{a\sqrt{2}}$$
$$= 4\cdot\frac{9\cdot10^9\cdot(-25)\cdot10^{-6}\cdot25\cdot10^{-6}}{-0.05} + \frac{9\cdot10^9\cdot(-25)\cdot10^{-6}\cdot25\cdot10^{-6}}{0.05\sqrt{2}} + \frac{9\cdot10^9\cdot25\cdot10^{-6}\cdot2510^{-6}}{0.05\sqrt{2}}$$
$$= 4\cdot(-112.5) + 2\cdot79.5 = -291J$$

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת היא 291– ג'אול. קיבלנו ערך נמוך יותר של האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המערכת עם המטען הרביעי בהפרש של:

$$DU = -291 - (-145.5) = -145.5J$$

משמעות ההפרש השלילי היא שלא דרושה עבודה נגד הכוח החשמלי, אלא שהכוח החשמלי מבצע עבודה של 145.5 ג'אול על המטען הרביעי במסלול מהאינסוף לקודקוד D. עבודה זו מתבטאת בתוספת לאנרגיה הקינטית של המטען הרביעי.

כדי למצוא את העבודה בסעיף ב' בדוגמה לעיל, מספיק היה לחבר רק את איברי האנרגיה הכוללים את המטען הנוסף, כי שלושת האיברים של המטענים הקבועים במקומם לא משתנים עם הוספת המטען הנוסף. דוגמה זו מביאה אותנו למושג הבא, הקשור באנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מטען יחיד, העובר ממקום למקום, כששאר המטענים קבועים במקומם. מושג הפוטנציאל.

פוטנציאל

הפוטנציאל V בנקודה מסוימת הוא האנרגיה הפוטנציאלית של מטען יחידה (מטען חיובי של +1C), אם הוא יימצא בנקודה זו. כלומר, העבודה הדרושה להביא מטען יחידה מהאינסוף לנקודה זו. בהגדרה זו מתחייב שהפוטנציאל באינסוף הוא 0:

$$V_{\infty} = 0$$

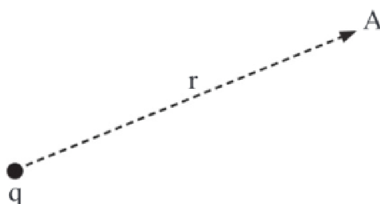
כאשר מטען q נמצא בנקודה עם פוטנציאל V, האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של המטען היא:

$$U = qV$$

על פי נוסחה זו, נקבל את יחידת המידה של הפוטנציאל: ג'אול לקולון, $\frac{j}{C}$, הנקראת גם וולט, V, על שמו של הפיזיקאי האיטלקי אלסנדרו וולטא (1827–1745).

הפוטנציאל של מטען נקודתי

הפוטנציאל בנקודה A המרוחקת מרחק r ממטען נקודתי q הוא האנרגיה הפוטנציאלית שתהיה למטען יחידה בנקודה A:



$$V_A = \frac{kq \cdot 1}{r} = \frac{kq}{r}$$

הפרש פוטנציאלים – מתח חשמלי

המתח החשמלי V_{AB} בין שתי הנקודות A ו-B הוא הפרש הפוטנציאלים בין שתי הנקודות:

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

פירוש הדבר, העבודה שמבצע השדה החשמלי על מטען יחידה במסלול מ-A ל-B (צורת המסלול אינה חשובה, כי השדה החשמלי הוא שדה משמר).

מכיוון שהעבודה היא השינוי באנרגיה הפוטנציאלית, העבודה שמבצע השדה החשמלי על גוף טעון במטען q במסלול מ-A ל-B היא:

$$W_{AB} = qV_A - qV_B = qV_{AB}$$

לפי **משפט עבודה אנרגיה**, העבודה היא שינוי באנרגיה הקינטית של הגוף:

$$w_{AB} = qV_{AB} = \Delta E_K$$

חוק שימור האנרגיה למטען יחיד הנע בשדה חשמלי

האנרגיה הכוללת של גוף טעון הנע בהשפעת שדה חשמלי בלבד (ללא השפעת כוחות נוספים), אינה משתנה:

$$U(A) + E_k(A) = U(B) + E_k(B)$$
$$qV_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = qV_B + \frac{1}{2}mv_B^2$$

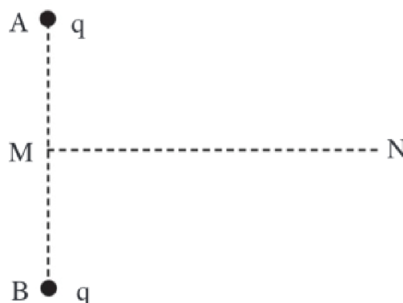
השימוש ב-v למהירות וב-V לפוטנציאל ולמתח הוא אכן בעייתי. עם זאת, כך מקובל, וחשוב לא להתבלבל בין המושגים. לכן מומלץ להקפיד על גודל האותיות בעת הכתיבה.

שאלה לדוגמה:

שני מטענים של $q = -2\mu C$ קבועים במקומם בנקודות A ו-B, המרוחקות 20 סנטימטרים זו מזו. נקודה M נמצאת באמצע הקטע AB, ונקודה N נמצאת 24 סנטימטרים מ-M על האנך האמצעי. ראו בתרשים שלפניכם:

א. מצאו את הפרש הפוטנציאלים בין M ל-N. איזו נקודה נמצאת בפוטנציאל גבוה יותר?

ב. גוף זעיר שמסתו $m = 2 \cdot 10^{-7} Kg$ טעון חיובית במטען של $Q = 5\mu C$, משוחרר ממנוחה בנקודה N, ונע לכיוון נקודה M. מה תהיה מהירותו כשיגיע ל-M?



הפתרון:

א. נחשב את הפוטנציאל בנקודה M:

$$V_M = \frac{kq}{AM} + \frac{kq}{BM} = \frac{9\cdot10^9\cdot(-2)\cdot10^{-6}}{0.1} + \frac{9\cdot10^9\cdot(-2)\cdot10^{-6}}{0.1} = -360,000V$$

$$V_N = \frac{kq}{AN} + \frac{kq}{BN} = \frac{9\cdot10^9\cdot(-2)\cdot10^{-6}}{\sqrt{0.1^2+0.24^2}} + \frac{9\cdot10^9\cdot(-2)\cdot10^{-6}}{\sqrt{0.1^2+0.24^2}} = -138,000V$$

נחשב את הפרש הפוטנציאלים:

$$V_{NM} = V_N - V_M = -138,000 - (-360,000) = 222,000V$$

נקודה N נמצאת בפוטנציאל גבוה יותר ב–222,000 וולט מנקודה M.

ב. נפתור לפי משפט עבודה אנרגיה.

$$w_{NM} = QV_{NM} = \Delta E_K$$
$$QV_{NM} = \frac{1}{2}mv_M{}^2 - \frac{1}{2}mv_N{}^2$$

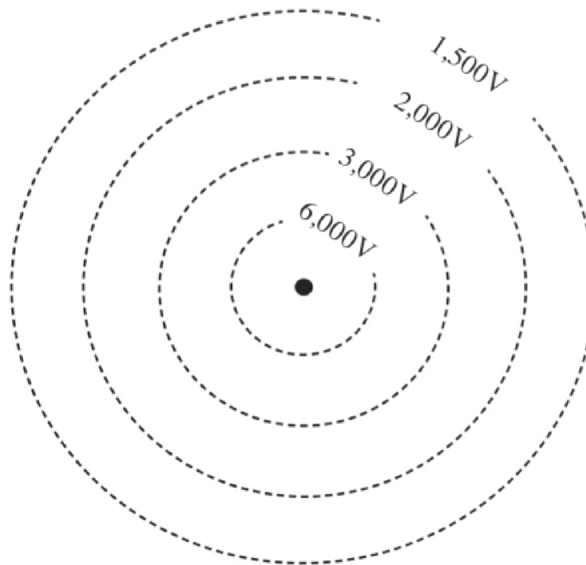
נציב:

$$5\cdot10^{-6}\cdot222,000 = \frac{1}{2}\cdot2\cdot10^{-7}v_M{}^2 - 0$$
$$v_M{}^2 = 1.11\cdot10^7$$
$$v_M = 3,330\frac{m}{s}$$

משטחים שווי פוטנציאל

משטח שווה פוטנציאל הוא המקום הגאומטרי של כל הנקודות שהפוטנציאל בהן שווה.

לדוגמה, משטחים שווי פוטנציאל של מטען נקודתי הם קליפות כדוריות שמרכזן במטען:



הקשר בין שדה לפוטנציאל

נחזור למשפט עבודה אנרגיה:

$$w_{AB} = qV_{AB}$$
$$F \cdot \Delta x = qV_{AB}$$
$$\cancel{q}E \cdot \Delta x = \cancel{q}V_{AB}$$
$$|\vec{E}| = \frac{V_{AB}}{\Delta x}$$

מסקנה

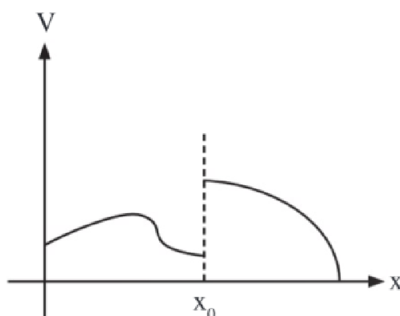
- גודלו של השדה החשמלי הוא השינוי של הפוטנציאל בקטע Dx.
- כיוון השדה הוא תמיד מהפוטנציאל הגבוה לפוטנציאל הנמוך.

הערות

- אם השדה אינו אחיד, אז מסקנה זו מתאימה לשדה הממוצע בקטע Dx.
- השדה תמיד מאונך למשטח שווה הפוטנציאל.

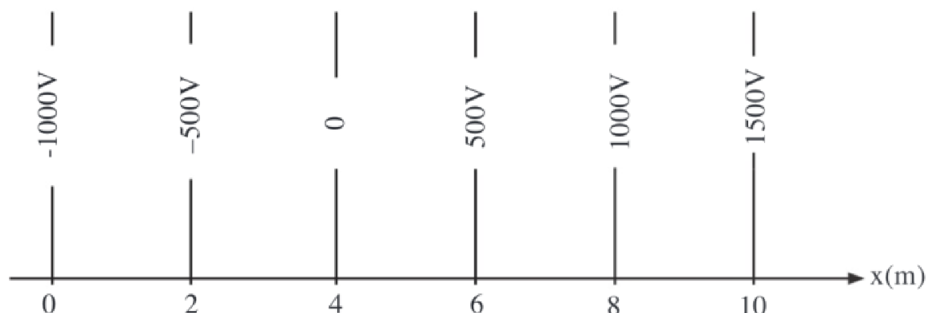
מסקנות נוספות

- בגרף של הפוטנציאל כפונקציה של המקום – V(x), עוצמת השדה מיוצגת על ידי שיפוע הגרף.
- יחידת המידה של השדה החשמלי יכולה להיות גם וולט למטר – $\frac{V}{m}$, והיא שקולה ליחידת המידה ניוטון לקולון – $\frac{N}{C}$.
- הפוטנציאל הוא תמיד רציף, כלומר אין קפיצות פוטנציאל, כי קפיצת פוטנציאל משמעותה שדה אינסופי. הגרף הבא אינו אפשרי, כי ב-x_0 השדה יהיה אינסופי בגודלו.



דוגמה:

משטחים שווי פוטנציאל של שדה אחיד:



הסבר: קצב שינוי הפוטנציאל לאורך ציר ה-x הוא קבוע, כלומר השדה הוא אחיד. לאורך 10 מטרים הפוטנציאל משתנה מ-1,000V– ל-1,500V, שינוי של 2,500V. לכן עוצמת השדה היא:

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{V_{AB}}{\Delta x} = \frac{2{,}500}{10} = 250\frac{V}{m}$$

עוצמת השדה היא $250\frac{V}{m}$, וכיוונו במורד הפוטנציאל (מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך) הוא שמאלה, נגד הכיוון החיובי של ציר ה-x.

השדה החשמלי בין שני לוחות קבל

בפרק הקודם למדנו שגודל השדה החשמלי בין שני לוחות קבל הוא $E = 4\pi k\sigma$. מכיוון שהשדה הוא אחיד, אנו יכולים לקבל ביטוי נוסף:

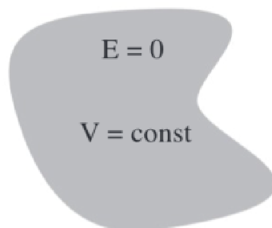
$$E = \frac{V_{AB}}{d}$$

כאשר:

V_{AB} – הפרש הפוטנציאלים בין שני הלוחות בוולט.

d – המרחק בין הלוחות.

הפוטנציאל של גוף מוליך



בפרק השדה החשמלי למדנו שהשדה החשמלי בתוך גוף מוליך הוא 0. בפרק זה למדנו שהשדה החשמלי הוא שינוי של הפוטנציאל. לפיכך, אם השדה הוא 0, אז הפוטנציאל לא משתנה, ונשאר אחיד בכל הגוף ועל פניו. מכיוון שהפוטנציאל הוא רציף גם בנקודה חיצונית, קרובה מאוד לפני המוליך (הנקודה השחורה שבתרשים), הפוטנציאל שווה לפוטנציאל של המוליך.

הפוטנציאל בסביבת קליפה כדורית טעונה

ניזכר בשדה בסביבת קליפה כדורית טעונה:

השדה מחוץ לקליפה הוא כאילו כל מטען הקליפה היה מרוכז במרכזה. והשדה בתוך הקליפה הוא 0.

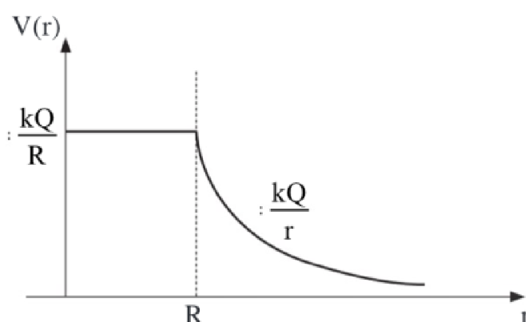
הפוטנציאל מחוץ לקליפה הוא כאילו כל מטען הקליפה היה מרוכז במרכזה.

- הפוטנציאל בתוך הקליפה הוא אחיד, ושווה לערך של הפוטנציאל שעל פני הקליפה.

לכן הפוטנציאל בסביבת קליפה כדורית שרדיוסה R הטעונה במטען Q הוא:

- בנקודה חיצונית $(R < r)$: $V(r) = \frac{kQ}{r}$
- בנקודה פנימית או בנקודה על הקליפה $(r \le R)$: $V(r) = \frac{kQ}{R}$

נמחיש זאת בגרף:



כדור מוליך טעון

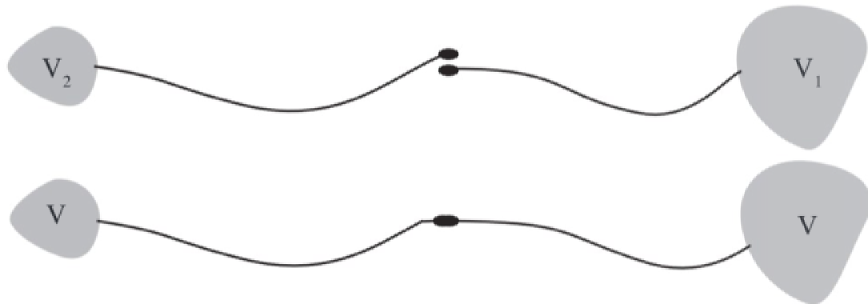
בכדור מוליך טעון המטען מתפזר באופן אחיד על פני הכדור, ופנים הכדור נשאר ניטרלי מבחינת המטען החשמלי. לכן השדה והפוטנציאל בסביבת כדור מוליך טעון הם כמו השדה והפוטנציאל בסביבת קליפה כדורית טעונה:

- בנקודה חיצונית $(R < r)$: $V(r) = \frac{kQ}{r}$
- בנקודה פנימית או בנקודה על הקליפה $(r \le R)$: $V(r) = \frac{kQ}{R}$

כאשר R – רדיוס הכדור.

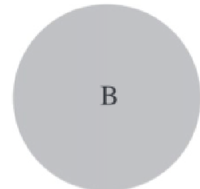
השוואת פוטנציאלים והארקה

כאשר מחברים שני גופים מוליכים זה לזה בתיל מוליך, יזרמו אלקטרונים חופשיים מגוף לגוף עד אשר **הפוטנציאלים שלהם** (ולא בהכרח המטענים שלהם) ישתוו זה לזה.



שאלה לדוגמה:

נתונים שני כדורים מוליכים A ו-B, המרוחקים זה מזה.



$q_B = 6mC$

$R_B = 0.4m$



$q_A = -2mC$

$R_A = 0.1m$

א. מהו הפוטנציאל של כל אחד מהכדורים?

ב. מחברים את שני הכדורים בתיל מוליך. מה יהיה המטען של כל אחד מהכדורים?

הפתרון:

א. לפי הנוסחה לפוטנציאל של כדור טעון:

$$V = \frac{kq}{R}$$

$$V_A = \frac{kq_A}{R_A} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(-2 \cdot 10^{-6}\right)}{0.1} = -180{,}000V$$

$$V_B = \frac{kq_B}{R_B} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{0.4} = 135{,}000V$$

ב. נסמן את המטענים של כדור A וכדור B לאחר החיבור ב- q_1 ו- q_2, בהתאמה. על פי חוק שימור המטען, המטען הכולל של שני הכדורים לא השתנה בעקבות החיבור, כלומר:

$$q_1 + q_2 = q_A + q_B = -2\mu C + 6\mu C = 4\mu C$$

כמו כן בעקבות החיבור, הפוטנציאלים שווים, לכן:

$$\frac{\cancel{k}q_1}{R_A} = \frac{\cancel{k}q_2}{R_B}$$

$$\frac{q_1}{0.1} = \frac{q_2}{0.4}$$

$$4q_1 = q_2$$

קיבלנו שתי משוואות בשני נעלמים:

$$\begin{cases} 4q_1 = q_2 \\ q_1 + q_2 = 4\mu C \end{cases}$$

פתרון מערכת המשוואות ייתן לנו את מטעני שני הכדורים לאחר החיבור:

$$q_1 = 0.8\mu C$$

$$q_2 = 3.2\mu C$$

לבדיקה, נחשב את הפוטנציאל של הכדורים לאחר החיבור:

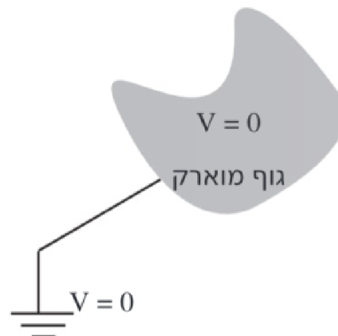
$$V_A = \frac{kq_1}{R_A} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 0.8 \cdot 10^{-6}}{0.1} = 72,000V$$

$$V_B = \frac{kq_2}{R_B} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3.2 \cdot 10^{-6}}{0.4} = 72,000V$$

אכן הפוטנציאל של שני הכדורים זהה.

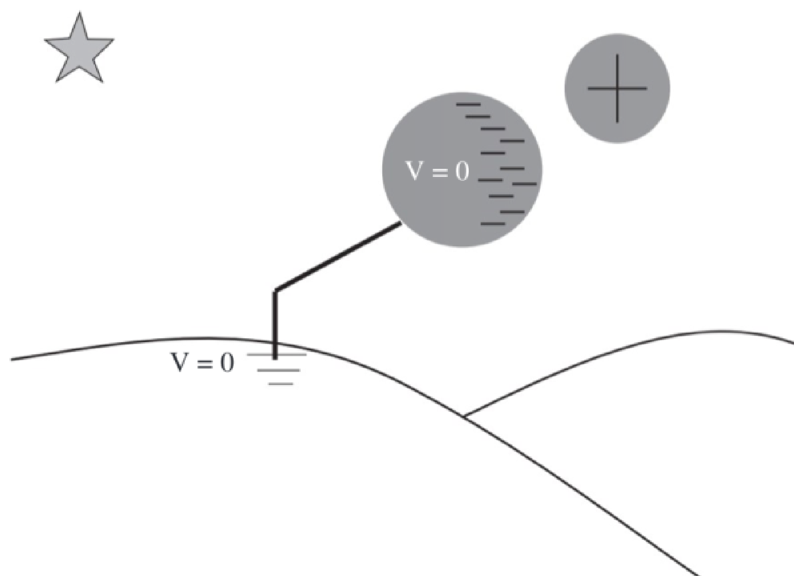
הארקה

הפוטנציאל של כדור הארץ נחשב כ-0. הארקה היא חיבור של גוף לכדור הארץ באמצעות מוליך, כך שפוטנציאל הגוף מתאפס. הסימון של ההארקה הוא: ⏚ . בגלל גודלו הרב של כדור הארץ, גם אם עברו מטענים אל כדור הארץ או ממנו, הפוטנציאל שלו נשאר קבוע.



הערה: הפוטנציאל של כדור הארץ שונה מהפוטנציאל באינסוף, אבל באופן מעשי אנחנו מתעניינים רק בהפרש הפוטנציאלים ולא בפוטנציאל המוחלט. לכן קביעת הפוטנציאל של כדור הארץ כאפס היא שימושית.

חשוב לדעת! הארקה מאפסת את פוטנציאל הגוף, אך לאו דווקא את מטענו. כפי שמתואר בדוגמה הבאה:



כדור טעון במטען חיובי מתקרב לכדור מוארק. הכדור המוארק נטען שלילית עקב השפעת הכדור החיובי, אלקטרונים חופשיים נמשכים אל הכדור החיובי, ועוברים מכדור הארץ אל הכדור המוארק. במצב זה המטען של הכדור המוארק שלילי, על אף שהפוטנציאל שלו הוא אפס.

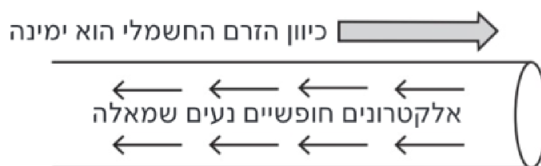
פרק 3 – הזרם החשמלי ומעגלי זרם ישר

הזרם החשמלי

זרם חשמלי הוא תנועה מכוונת של חלקיקים טעונים. החלקיקים הטעונים יכולים להיות יונים חיוביים או שלילים באלקטרוליט, אבל בדרך כלל החלקיקים הטעונים הם אלקטרונים חופשיים במוליך, שיכולים לנוע ממקום למקום בתוך המוליך (ראו מבוא). האלקטרונים החופשיים נעים בתנועה תמידית במהירות גבוהה מאוד (מיליוני מטרים לשנייה). תנועה זו נקראת **תנועה תרמית**, ובה האלקטרונים החופשיים נעים לכל הכיוונים בצורה אקראית. אבל על אף מהירותם הגבוהה, גוף האלקטרונים החופשיים בכללותו לא מתקדם לשום כיוון, לכן התנועה התרמית אינה מסודרת ואינה זרם חשמלי. נוסף על התנועה התרמית, האלקטרונים החופשיים נעים בהשפעת שדה חשמלי, בתנועה מסודרת, כלומר לא בכיוון אקראי אלא כולם באותו כיוון. התנועה המסודרת היא איטית, בסדר גודל של מילימטרים לשנייה, נגד כיוון השדה החשמלי. תנועה זו היא זרם חשמלי.

הגדרת הזרם החשמלי

כיוון הזרם החשמלי מוגדר ככיוון התנועה של המטענים החיוביים. לכן האלקטרונים החופשיים נעים בניגוד לכיוון הזרם. ראו בתרשים שלפניכם:



עוצמת הזרם החשמלי, I, היא כמות המטען החשמלי העובר דרך חתך של מוליך ליחידת זמן, או בנוסחה הבאה:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

הזרם נמדד ביחידה של קולון לשנייה, הנקראת גם אמפר – A, על שם הפיזיקאי הצרפתי אנדרה מרי אמפר (1836–1775).

אמפר הוא אחת מהיחידות הבסיסיות במערכת היחידות הסטנדרטית – .S.I שכוללת את המטר, את הקילוגרם ואת השנייה. על הגדרת האמפר ראו בפרק השדה המגנטי.

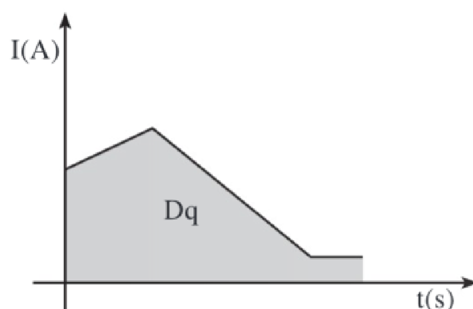
הגדרת יחידת המטען: קולון

על פי האמפר אפשר להגדיר את יחידת המטען הקולון.

קולון אחד הוא כמות המטען החשמלי העובר דרך חתך של מוליך, שזורם בו זרם של אמפר אחד, במשך שנייה אחת.

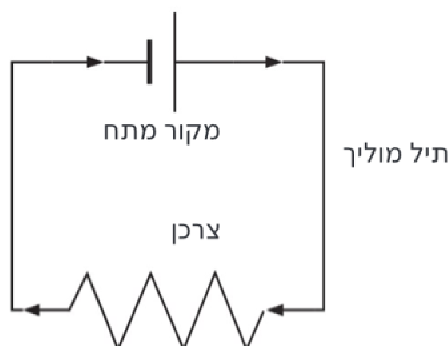
גרף של זרם כפונקציה של הזמן

בגרף של זרם חשמלי במוליך כפונקציה של הזמן, השטח הכלוא בין הגרף לבין ציר הזמן מייצג את כמות המטען שעברה במוליך בפרק הזמן הנתון.



המעגל החשמלי הבסיסי: מקור המתח והצרכן

המעגל החשמלי הבסיסי כולל מקור מתח, צרכן (נגד) ותילים מוליכים.



מקור המתח מספק אנרגיה למעגל, כלומר הוא ממיר אנרגיה כלשהי לאנרגיה חשמלית, ואחראי גם ליצירת הזרם במעגל הסגור. מקור המתח מסומן כשני קווים מקבילים. הקו הארוך מסמן את ההדק

החיובי, והקו הקצר מסמן את ההדק השלילי. בין שני הדקי מקור המתח קיים הפרש פוטנציאלים הנקרא מתח ההדקים – V. כך שהפוטנציאל של ההדק החיובי גבוה מהשלילי (ראו הרחבה בהמשך, כא"מ ומתח הדקים).



הצרכן צורך אנרגיה, כלומר הוא ממיר אנרגיה חשמלית לאנרגיה כלשהי. גם לצרכן שני הדקים, והפרש הפוטנציאלים ביניהם נקרא מפל המתח, או פשוט המתח על הצרכן. במקרים רבים הצרכן נקרא נגד – R. ראו התנגדות חשמלית בהמשך. הסימונים המקובלים לנגד הם:

נגד



נגד, צרכן



נורה



תילים מוליכים מחברים בין רכיבי המעגל, כך שנוצר מעגל סגור.

הזרם במעגל חשמלי

הזרם החשמלי שמחוץ למקור המתח זורם במורד הפוטנציאל, כלומר מההדק החיובי אל ההדק השלילי. בתוך המקור הזרם עולה במעלה הפוטנציאל, מההדק השלילי אל ההדק החיובי.

יש לזכור שכיוון הזרם מוגדר ככיוון הזרימה של המטענים החיוביים. בפועל, במוליך זורמים אלקטרונים חופשיים בכיוון הנגדי, נגד כיוון החץ.

התנגדות

התנגדות של נגד R מוגדרת כיחס בין המתח על הנגד לבין הזרם הזורם בו:

$$R = \frac{V}{I}$$

מהגדרה זו נובע שהיחידה של התנגדות היא וולט לאמפר, הנקראת גם אוהם, וסימנה Ω.

בדרך כלל התנגדות של נגד היא קבועה. במקרה זה מתקיים חוק אוהם:

חוק אוהם

בנגד שהתנגדותו קבועה, קיים יחס ישר בין המתח על הנגד לבין הזרם הזורם דרכו. יחס זה מתבטא בנוסחה הבאה:

$$V = IR$$

כאשר:

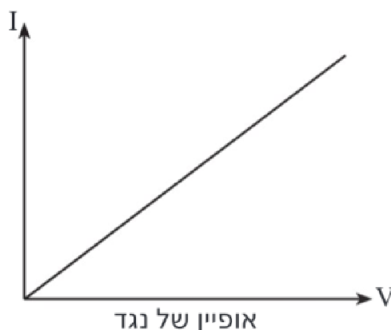
V – המתח על הנגד בוולט ‑ V.

I – הזרם הזורם בנגד באמפר – A.

R – ההתנגדות של הנגד באוהם – Ω.

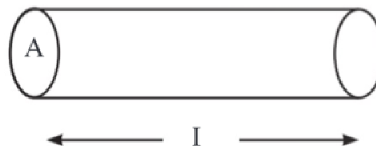
בגרף של זרם בנגד כפונקציה של המתח עליו, יחס ישר זה מתבטא כקו ישר, ששיפועו $\frac{1}{R}$, העובר בראשית.

גרף של הזרם כפונקציה של המתח נקרא **אופיין**.



התנגדות סגולית

התנגדות של מוליך המקיים את חוק אוהם, כמו תיל מתכתי, נמצאת ביחס ישר לאורכו וביחס הפוך לשטח החתך שלו, על פי הנוסחה הבאה (מופיעה בנוסחאון):



$$R = \rho \frac{l}{A}$$

כאשר:

R – ההתנגדות ב- Ω.

l – אורך המוליך במטרים.

A – שטח החתך של המוליך ב- m^2.

r – ההתנגדות הסגולית של חומר המוליך ב-$m \cdot \Omega$.

הספק

הספק הוא קצב המרת האנרגיה:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

יחידת ההספק היא ג'אול לשנייה הנקראת גם ואט – W.

ההספק של מקור מתח הוא קצב המרת האנרגיה שצורך המקור לאנרגיה חשמלית.

חוק ג'אול

$$P = IV$$

כאשר:

P – הספק המקור בוואט – W.

V – המתח בין הדקי המקור בוולט – V.

– הזרם הזורם דרך המקור באמפר – A.

הספק של צרכן או נגד הוא קצב המרת האנרגיה החשמלית שצורך הצרכן לאנרגיה כלשהי. על פי חוק ג׳אול וחוק אוהם, להספק מתקבלים שלושה ביטויים:

$$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R}$$

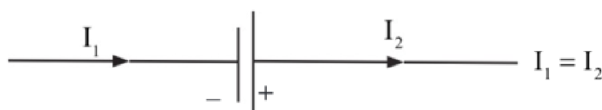
מעגלי זרם ישר

יישומים של חוק שימור המטען במעגל החשמלי

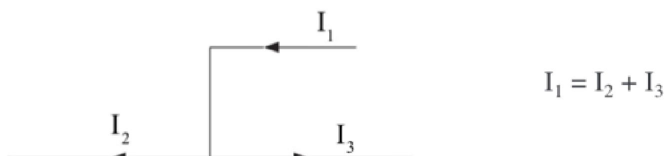
- זרם חשמלי הנכנס לנגד, שווה לזרם היוצא ממנו, כי הנגד אינו צורך מטען חשמלי אלא את האנרגיה החשמלית.



- זרם חשמלי הנכנס למקור המתח, שווה לזרם היוצא ממנו, כי מקור המתח לא מייצר מטענים חשמליים אלא מספק למטענים אנרגיה חשמלית.

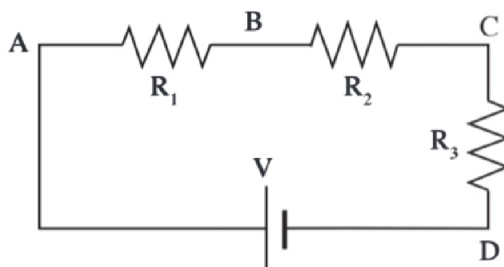


- חוק הצומת: סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים ממנו.



חיבור נגדים בטור

חיבור טורי הוא חיבור של מספר נגדים בזה אחר זה, ללא צמתים ביניהם. בתרשים שלפניכם נראים שלושה נגדים המחוברים בטור למקור המתח. נציין שתי תכונות מרכזיות:



1. בנגדים המחוברים בטור, זורם זרם שווה גם אם התנגדותם שונה, על פי חוק שימור המטען.

$$I_t = I_2 = I_3$$

2. בנגדים המחוברים בטור למקור המתח, כמו בתרשים למעלה, סכום המתחים עליהם שווה למתח בין הדקי המקור.

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = (V_B - V_A) + (V_C - V_B) + (V_D - V_C) = V_D - V_A = V_{AD}$$

התנגדות שקולה

נגד השקול, $\mathbf{R_t}$, לקבוצה של מספר נגדים, הוא נגד שאם נחבר אותו למעגל במקום קבוצת הנגדים, הזרם דרך המקור לא ישתנה. ההתנגדות של הנגד השקול נקראת התנגדות שקולה (הזרם דרך מקור המתח נקרא I_t – I total).

התנגדות שקולה של מספר נגדים $(R_1, R_2, R_3 \cdots)$ המחוברים בטור, היא סכום ההתנגדויות שלהם:

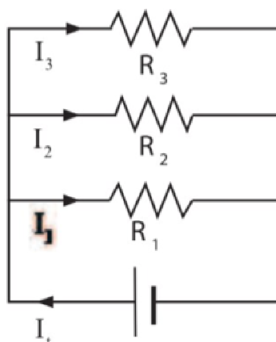
$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$$

חיבור נגדים במקביל

במעגל שבתרשים שלפניכם נראים שלושה נגדים המחוברים למקור מתח. הזרם דרך המקור, I_t, מתפצל לשלושה זרמים, I_1, I_2, I_3 המתלכדים וחוזרים למקור.

1. על נגדים המחוברים במקביל יש מתחים שווים, גם אם התנגדותם שונה.

$$V_1 = V_2 = V_3$$



2. בנגדים המחוברים במקביל למקור המתח, סכום הזרמים דרכם שווה לזרם דרך המקור.

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_t$$

הנוסחה להתנגדות השקולה של מספר נגדים $(R_1, R_2, R_3 \cdots)$ המחוברים במקביל היא:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$$

התרת מעגל חשמלי

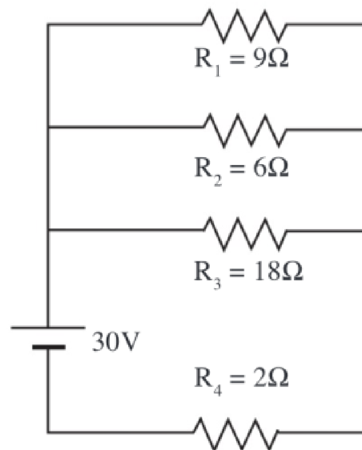
השימוש בנגדים שקולים מאפשר להתיר מעגלים חשמליים מורכבים יותר, כלומר למצוא את הזרם בכל אחד מהנגדים. לפניכם דוגמאות של שימוש בנגדים שקולים.

שאלות לדוגמה:

1. בתרשים 1א' נתון המעגל הבא:

   א. חשבו את הזרם בכל אחד מהנגדים.

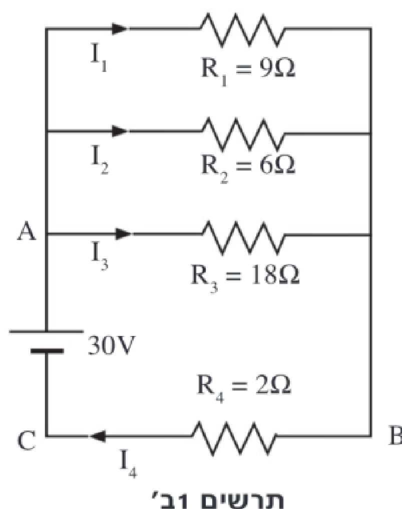
   ב. הראו שמתקיים במעגל חוק שימור האנרגיה, כלומר הספק המקור שווה לסכום ההספקים של כל הנגדים.



תרשים 1א'

הפתרון:

א. **בשלב הראשון** נקבע את כיווני הזרמים. ראו תרשים 1ב':



תרשים 1ב'

על פי כיווני הזרמים אנו רואים שלושה נגדים המחוברים (R_1, R_2, R_3) במקביל, ונגד רביעי, R_4, המחובר אליהם בטור.

בשלב השני נאחד את שלושת הנגדים R_1, R_2, R_3 לנגד השקול להם – R_{II}, על פי הנוסחה לחיבור נגדים במקביל:

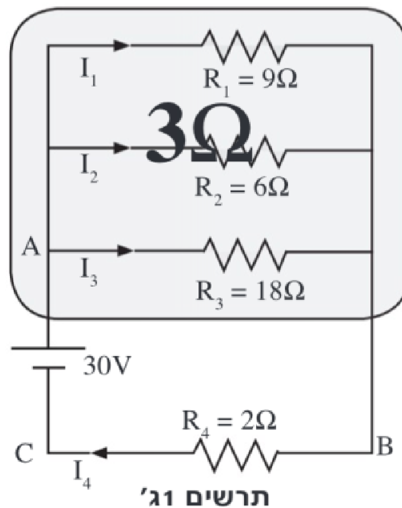
$$\frac{1}{R_{II}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{9} + \frac{1}{6} + \frac{1}{18} = \frac{1}{3}$$

$$R_{II} = 3\Omega$$

בשלב השלישי נמצא את ההתנגדות השקולה של המעגל – R_t.

לפי תרשים 1ג', הנגד השקול R_{II} מחובר בטור לנגד R_4, לכן ההתנגדות השקולה של המעגל היא:

$$R_t = R_{II} + R_4 = 3 + 2 = 5\Omega$$



תרשים 1ג'

הזרם דרך המקור הוא $I_t = \frac{V}{R_t} = \frac{30}{5} = 6A$, וזהו גם הזרם I_4.

$$\boxed{I_4 = 6A}$$

בשלב הרביעי נמצא את הזרמים I_1, I_2, I_3. נחשב את המתח V_{BC} לפי חוק אוהם:

$$V_{BC} = I_4 \cdot R_4 = 6 \cdot 2 = 12V$$

נמצא את המתח V_{AB} לפי חיסור מתחים:

$$V_{AC} = V_{AB} + V_{BC}$$
$$30 = V_{AB} + 12$$
$$V_{AB} = 18V$$

שלושת הנגדים R_1, R_2, R_3 מחוברים בין הנקודות A ו–B, לכן המתח על כל אחד מהם הוא V_{AB}.

נמצא את הזרמים I_1, I_2, I_3:

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{18}{9} = 2A$$
$$I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{18}{6} = 3A$$
$$I_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{18}{18} = 1A$$

קיבלנו את ארבעת הזרמים.

ב. נשתמש בנוסחה $P = I^2R$, ונחבר את ההספקים של כל הנגדים:

$$P_1 = I_1^2R_1 = 2^2 \cdot 9 = 36W$$
$$P_2 = I_2^2R_2 = 3^2 \cdot 6 = 54W$$
$$P_3 = I_3^2R_3 = 1^2 \cdot 18 = 18W$$
$$P_4 = I_4^2R_4 = 6^2 \cdot 2 = 72W$$

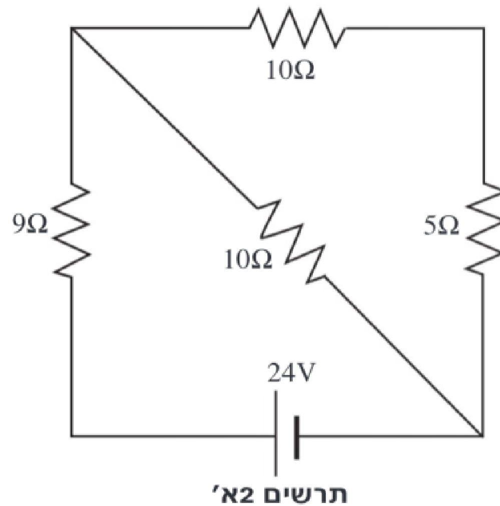
סכום ההספקים של כל הנגדים הוא $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 180W$.

נחשב את הספק המקור לפי חוק ג'אול:

$$P = IV = 6 \cdot 30 = 180W$$

הראינו שהספק המקור שווה לסכום ההספקים של כל הנגדים.

2. במעגל שבתרשים 2א' נתונים ארבעה נגדים המחוברים למקור מתח.



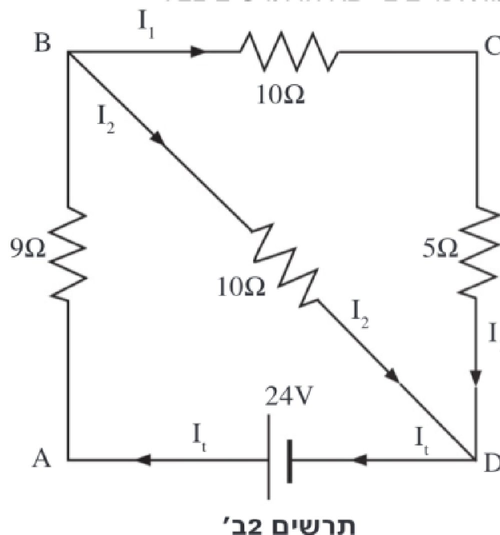
תרשים 2א'

א. מהי ההתנגדות השקולה של ארבעת הנגדים?

ב. מצאו את הזרם בכל אחד מהנגדים.

הפתרון:

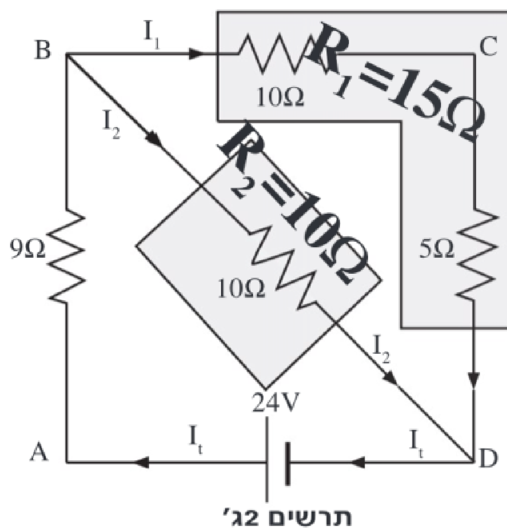
א. **בשלב הראשון** נקבע את כיווני הזרמים במעגל, כדי לקבוע אילו נגדים מחוברים בטור או במקביל. הזרם I_t יוצא מההדק החיובי של המקור, עובר את הנגד של ה- 9Ω ומגיע ל-B. בצומת B הזרם מתפצל ל- I_1 ול-I_2, המתלכדים ב-D. ראו תרשים 2ב'.



תרשים 2ב'

בשלב השני נאחד נגדים, לנגדים שקולים:

בענף של הזרם I_1 מחוברים שני נגדים בטור. נאחד אותם לנגד אחד: $R_1 = 10 + 5 = 15\Omega$. נסמן את הנגד על האלכסון ב- R_2. שני הנגדים R_1 ו- R_2 מקבילים זה לזה. ראו תרשים 2ג':



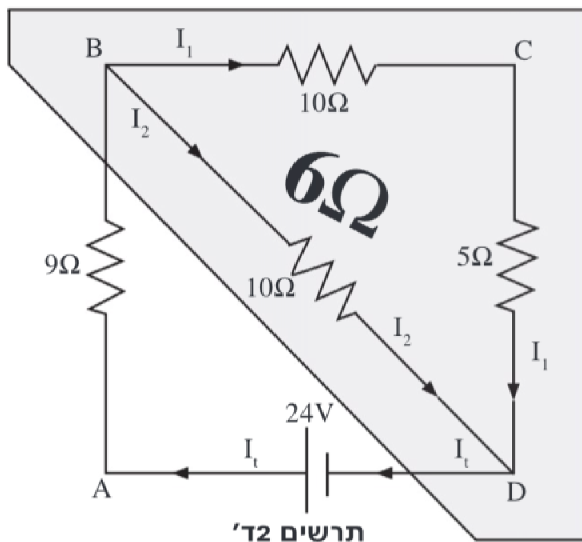
תרשים 2ג'

נחבר את R_1 ו- R_2 לפי הנוסחה של חיבור נגדים במקביל:

$$\frac{1}{R_{BD}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{15} = \frac{5}{30}$$

$$R_{BD} = 6\Omega$$

קיבלנו את המעגל הבא, המופיע בתרשים ד2':



תרשים ד2'

שלושת הנגדים שבמתחם האפור שקולים לנגד אחד של $R_{BD} = 6\Omega$.

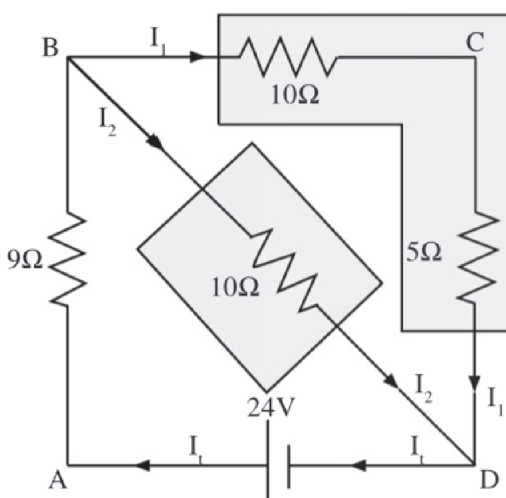
בסוף התהליך התקבלו שני נגדים המחוברים בטור למקור המתח:

$$R_{AB} = 9\Omega$$
$$R_{BD} = 6\Omega$$
$$R_t = R_{AB} + R_{BD} = 9\Omega + 6\Omega = 15\Omega$$

ההתנגדות השקולה של ארבעת הנגדים היא 15Ω.

ב. נחשב את הזרם I_t:

$$I_t = \frac{V}{R_t} = \frac{24}{15} = 1.6A$$



הזרם בנגד של 9Ω הוא $I_t = 1.6A$. נותר למצוא את הזרמים בענפים המקבילים, I_1 ו-I_2. נציג שתי דרכים לפתרון:

דרך (1): השוואת מתחים על נגדים במקביל:

המתח במסלול BCD הוא:

$$V_{BD} = V_{BC} + V_{CD} = R_{BC} \cdot I_1 + R_{CD} \cdot I_1 = 10 \cdot I_1 + 5 \cdot I_1 = 15I_1$$

המתח במסלול BD האלכסוני הוא:

$$V_{BD} == R_2 \cdot I_2 = 10I_2$$

המתח בין שתי נקודות אינו תלוי במסלול, לכן:

$$15I_1 = 10I_2$$

לפי חוק הצומת:

$$I_1 + I_2 = I_t = 1.6A$$

פתרון מערכת המשוואות ייתן לנו את הזרמים המבוקשים:

$$I_1 = 0.64A$$
$$I_2 = 0.96A$$

דרך (2): סכום המתחים על נגדים בטור.

נמצא את המתח V_{BD} :

$$V_{AB}+V_{BD}=V_{AD}$$
$$I_t\cdot R_{AB}+V_{BD}=V_{AD}$$
$$9\cdot 1.6+V_{BD}=24$$
$$V_{BD}=9.6V$$

נחשב את הזרמים לפי חוק אוהם:

$$I_1=\frac{V_{BD}}{R_1}=\frac{9.6}{15}=0.64A$$
$$I_2=\frac{V_{BD}}{R_2}=\frac{9.6}{10}=0.96A$$

מכשירי מדידה

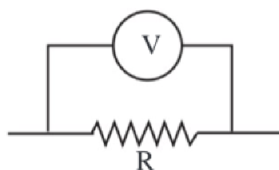
האמפרמטר (מד זרם): מודד את הזרם העובר בו. לכן יש לחבר את האמפרמטר בטור לנגד או לענף שאת הזרם בו רוצים למדוד. חיבור האמפרמטר יכול להשפיע על הזרמים במעגל, לכן על התנגדות האמפרמטר להיות קטנה ככל האפשר.



חיבור של אמפרמטר

אמפרמטר אידאלי הוא אמפרמטר שהתנגדותו 0.

הוולטמטר (מד מתח): מודד את הפרש הפוטנציאלים (המתח) בין שתי נקודות במעגל. לכן כדי למדוד את המתח בין שתי הנקודות, יש לחבר את הדקי הוולטמטר לשתי הנקודות, במקביל לנגד (או לרכיב אחר). חיבור הוולטמטר יכול להשפיע על המתחים במעגל, לכן על התנגדות הוולטמטר להיות גדולה ככל האפשר.



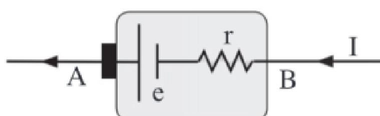
חיבור של וולטמטר

וולטמטר אידאלי הוא וולטמטר שהתנגדותו אינסופית, כך שלא זורם דרכו זרם.

כא"מ ומתח הדקים

הזרם הזורם במעגל חשמלי זורם גם דרך מקור המתח. גם למקור יש התנגדות הנקראת **התנגדות פנימית**, והיא מסומנת ב–r. כאשר זורם זרם במקור, חלק מהאנרגיה שמספק מקור המתח "מתבזבז" במקור עצמו והופך לחום.

מתח ההדקים: הפרש הפוטנציאלים בין הדקי המקור.



כא"מ e: כמות האנרגיה שמקור המתח מספק לכל יחידת מטען של 1 קולון העובר דרכו. האנרגיה הזו היא תוצאה של עבודת הכוח הפועל על המטענים כנגד כוח הדחייה של השדה החשמלי, בעת העברת האלקטרונים מההדק החיובי אל השלילי.

הגדרה אופרטיבית יותר לכא"מ היא: הפרש הפוטנציאלים בין הדקי המקור כאשר לא זורם בו זרם.

מקור מתח אידאלי הוא מקור מתח שהתנגדותו הפנימית היא 0. כך שמתח ההדקים מתלכד עם הכא"מ.

מתח ההדקים שווה לכא"מ, פחות מפל המתח על הנגד הפנימי:

$$V_{AB} = e - I_t r$$

נצילות

עקב בזבוז האנרגיה במקור המתח, ההספק שצורך המקור גדול מההספק שהוא מספק. הנצילות של המעגל החשמל η (האות היונית אטה), מוגדרת כיחס בין הספק שמקור המתח מספק לצרכנים, לבין ההספק שהוא עצמו צורך. הנצילות לא יכולה להיות גדולה מ–1: $0 \leq \eta \leq 1$, והיא חסרת יחידות. אפשר לבטא את הנצילות גם באחוזים. נראה שהנצילות היא גם היחס בין מתח ההדקים לכא"מ.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{IV}{I\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon}$$

נביע את הנצילות לפי הנגדים:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{IR_{ex}}{I\left(R_{ex} + r_{in}\right)} = \frac{R_{ex}}{\left(R_{ex} + r_{in}\right)}$$

או במילים: הנצילות שווה ליחס בין ההתנגדות השקולה ללא הנגד הפנימי, להתנגדות השקולה כולל הנגד הפנימי.

הערה: כל נושא הנצילות אינו מופיע בנוסחאון. לא מומלץ לנסות לזכור בעל פה את כל הנוסחאות, אלא רק ללמוד את ההגדרה.

שאלה לדוגמה:

מקור מתח בעל כא"מ של 9 וולט והתנגדות פנימית של 60 אוהם, מפעיל צעצוע בעל התנגדות 240 אוהם.

א. שרטטו את המעגל.

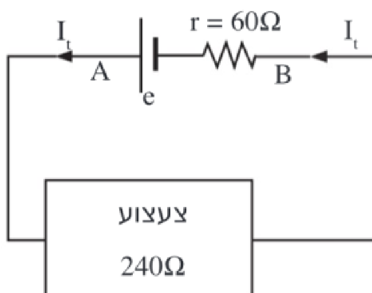
ב. מצאו את מתח ההדקים.

ג. מהו הספק הצעצוע?

ד. מהי נצילות המעגל החשמלי?

הפתרון:

א. שרטוט המעגל:



ב. כדי למצוא את מתח ההדקים יש למצוא תחילה את הזרם דרך המקור (נסמן ב–R את התנגדות הצעצוע):

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{9}{240+60} = 0.03A$$

נמצא את מתח ההדקים:

$$V = \varepsilon - I_t r = 9 - 0.03 \cdot 60 = 7.2V$$

ג. לפי נוסחת ההספק:

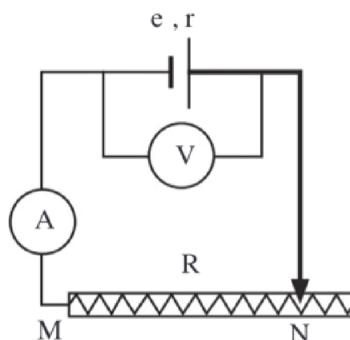
$$P = I^2 R = 0.03^2 \cdot 240 = 0.216W$$

ד. הנצילות שווה למתח ההדקים חלקי הכא"מ:

$$\eta = \frac{7.2}{9} = 0.8 = 80\%$$

ניסוי: מציאת מתח הכא"מ ומתח ההדקים של סוללה

מערכת הניסוי היא המעגל החשמלי הנתון בתרשים שלפניכם:

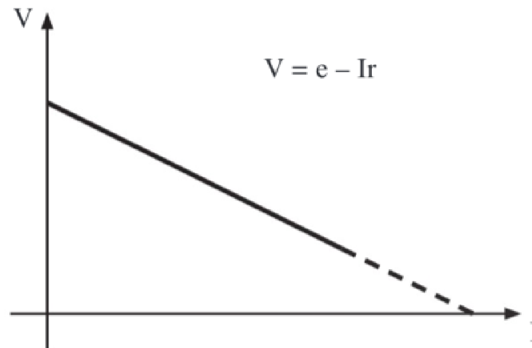


הפס המוליך MN משמש כנגד משתנה. הזזת המגע הנייד N, משנה את ההתנגדות R. סימון מקובל נוסף לנגד משתנה הוא: . מכשירי המדידה נחשבים אידאליים. האמפרמטר מחובר בטור, לכן

הוא מודד את הזרם. הוולטמטר מחובר במקביל להדקי המקור, לכן הוא מודד את מתח ההדקים.

במהלך הניסוי מזיזים את המגע הנייד, ומודדים את מתח ההדקים ואת הזרם. משרטטים גרף של מתח ההדקים כפונקציה של הזרם:

על פי הגרף שמתקבל, אפשר לחשב את הכא"מ ואת מתח ההדקים של הסוללה:



- נקודת החיתוך עם ציר V מייצגת את הכא"מ.
- שיפוע הגרף בערכו המוחלט שווה להתנגדות הפנימית.
- נקודת החיתוך עם ציר I מייצגת את הזרם, כשמתח ההדקים מתאפס. מצב זה מתרחש כאשר הנגד החיצוני הוא 0, כלומר המגע הנייד N מתלכד עם M. במצב זה הזרם גבוה למדי: $I = \frac{\varepsilon}{r}$, לכן בדרך כלל לא מגיעים אליו בביצוע הניסוי, זו הסיבה לקו המקווקו. זרם זה מכונה בשם זרם הַקֶּצֶר.

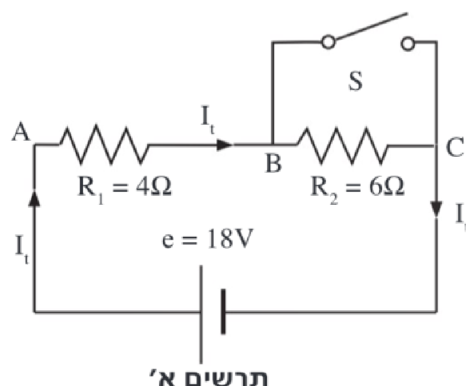
קצר ונתק

קצר חשמלי הוא חיבור של תיל מוליך, שהתנגדותו זניחה, בין שתי נקודות במעגל. חיבור זה גורם למתח בין שתי הנקודות להתאפס.

נתק בענף של המעגל החשמלי אינו מאפשר זרם באותו ענף.

שאלה לדוגמה:

בתרשים א׳ מחוברים שני נגדים למקור מתח אידאלי, והמפסק פתוח.



תרשים א׳

א. חשבו את המתח על כל אחד מהנגדים.

ב. מהו המתח על המפסק?

ג. מהו המתח על כל אחד מהנגדים כשהמפסק סגור?

הפתרון:

א. דרך המפסק הפתוח לא זורם זרם, לכן הזרם שווה בשני הנגדים, והוא: I_t.

נחשב את הזרם I_t:

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} = \frac{18}{4+6} = 1.8A$$

נחשב את המתח על כל אחד מהנגדים לפי חוק אוהם:

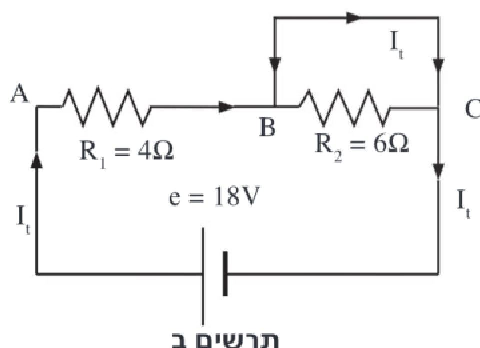
$$V_{AB} = I_t R_1 = 1.8 \cdot 4 = 7.2V$$
$$V_{BC} = I_t R_2 = 1.8 \cdot 6 = 10.8V$$

כצפוי גם קיבלנו:

$$\varepsilon = V_{AB} + V_{BC}$$

ב. זו תהיה טעות נפוצה לחשוב שהמתח על המפסק הוא 0. אמנם הזרם דרך המפסק הוא 0, אבל המפסק אינו מוליך, ואין זה נכון להשתמש כאן בחוק אוהם. הדקי המפסק מחוברים ל-B ול-C, לכן המתח על המפסק הוא: $V_{BC} = 10.8V$

ג. סגירת המפסק תגרום **קצר** בין B ל-C. שמשמעותו $V_{BC} = 0$, כלומר המתח על הנגד R_2 הוא 0. אפשר גם לומר שהזרם החשמלי עוקף את הנגד R_2. מכיוון שמתקיים $\varepsilon = V_{AB} + V_{BC}$, כל המתח נופל על הנגד R_1, לכן $V_{AB} = \varepsilon = 18V$.

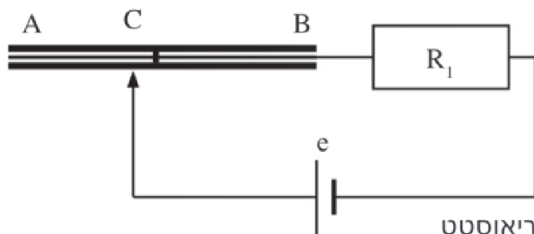


תרשים ב

ריאוסטט ופוטנציומטר

ריאוסטט ופוטנציומטר הם שני סוגי חיבור של מעגל חשמלי, הכולל מקור מתח e, נגד משתנה וצרכן R_1, שמטרתם לקבל מתח משתנה, V_1, על הצרכן. נניח שהתנגדותו הפנימית של המקור זניחה.

ריאוסטט: מעגל שבו הצרכן והנגד המשתנה מחוברים בטור למקור המתח. הזזת המגע הנייד C, משנה את התנגדות הקטע BC של הנגד המשתנה, וכך משתנים הזרם והמתח בצרכן.



ריאוסטט

הזרם במעגל הוא:

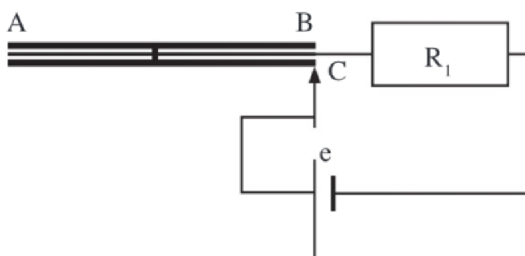
$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{\varepsilon}{R_{CB} + R_1}$$

לכן המתח על הצרכן הוא:

$$V_1 = I_t R_1 = \frac{\varepsilon \cdot R_1}{R_{CB} + R_1}$$

קיבלנו מתח משתנה V_1 על הצרכן:

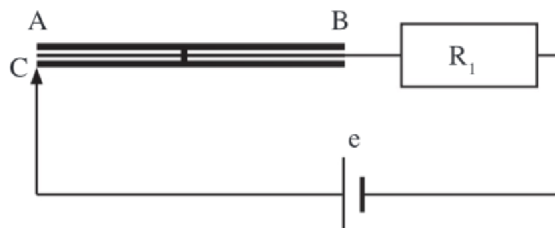
כדי לקבל מתח מרבי, יש להזיז את המגע הנייד C כך שיתלכד עם B. ראו בתרשים שלפניכם:



במצב זה הנגד המשתנה אינו חלק מהמעגל. כל המתח נופל על R_1, לכן המתח המרבי הוא:

$$V_{1(max)} = \varepsilon$$

כדי לקבל מתח מינימלי, יש להזיז את המגע הנייד C, כך שיתלכד עם A. ראו בתרשים שלפניכם:

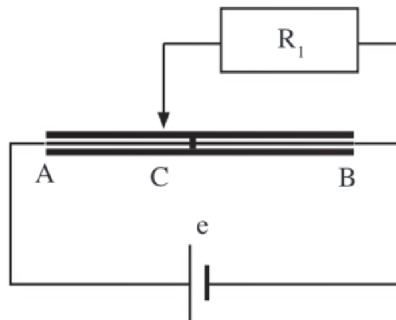


המתח המינימלי הוא:

$$V_{1(min)} = \frac{\varepsilon \cdot R_1}{R_{AB} + R_1}$$

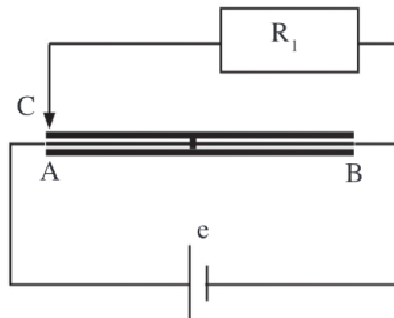
לפי הביטוי, המתח המינימלי לא יורד עד ל-0, וזה החיסרון העיקרי של הריאוסטט.

פוטנציומטר: מעגל שבו הצרכן והנגד המשתנה מחוברים למקור באופן הבא:



המגע הנייד C מחלק את הנגד המשתנה לשני נגדים נפרדים, והצרכן מחובר במקביל ל- R_{CB}. הזזת המגע הנייד C גורמת שינוי של הזרם והמתח בצרכן.

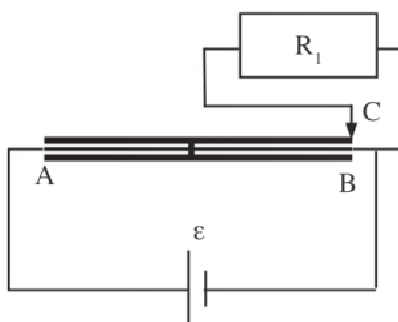
כדי לקבל מתח מרבי, יש להזיז את המגע הנייד C, כך שיתלכד עם A. ראו בתרשים שלפניכם:



במצב זה המתח על הנגד R_{AB} ועל הצרכן R_1 שווה למתח המקור, לכן המתח המרבי הוא:

$$V_{t(max)} = e$$

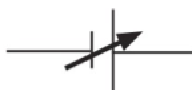
כדי לקבל מתח מינימלי, יש להזיז את המגע הנייד C כך שיתלכד עם B. ראו בתרשים שלפניכם:



זהו מצב של קצר בין הדקי הצרכן, לכן המתח המינימלי בין הדקי הנגד הוא 0.

זה היתרון העיקרי של הפוטנציומטר על פני הריאוסטט: אפשר לקבל באמצעותו את כל תחום המתחים, מ-0 עד ל-ε.

אפשר להתייחס אל הפוטנציומטר כאל מקור מתח משתנה המסומן כך:



החיסרון של הפוטנציומטר הוא שהזרם במקור המתח גדול יותר מהזרם בצרכן. גם כשהמתח על הצרכן הוא 0, עדיין זורם זרם דרך המקור, כלומר הפוטנציומטר בזבזני יותר מהריאוסטט.

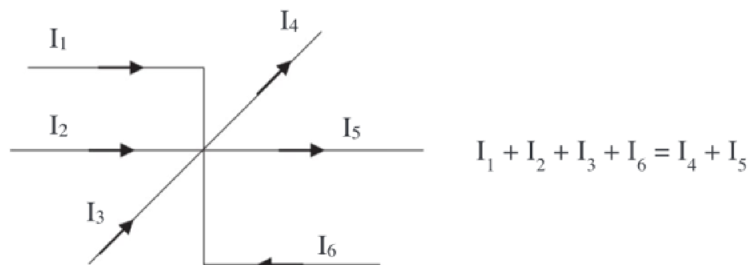
חוקי קירכהוף

החוק הראשון של קירכהוף – חוק הצומת

סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים ממנו.

החוק הראשון של קירכהוף מבוסס על חוק שימור המטען.

לדוגמה:



$$I_1 + I_2 + I_3 + I_6 = I_4 + I_5$$

הערה: מספר המשוואות של חוק הצומת שאפשר להשתמש בו קטן ב–1 ממספר הצמתים, למשל, אם יש שלושה צמתים, יש להציב שתי משוואות של חוק הצומת לכל היותר.

החוק השני של קירכהוף חוק – כלל הלולאה (או חוק המסלול הסגור)

מסלול סגור הוא מסלול שמתחיל ומסתיים באותה הנקודה.

סכום הכא"מים של מקורות המתח לאורך מסלול סגור שווה לסכום כל המתחים על הנגדים במסלול (כולל הנגדים הפנימיים).

$$\Sigma\varepsilon = \Sigma IR$$

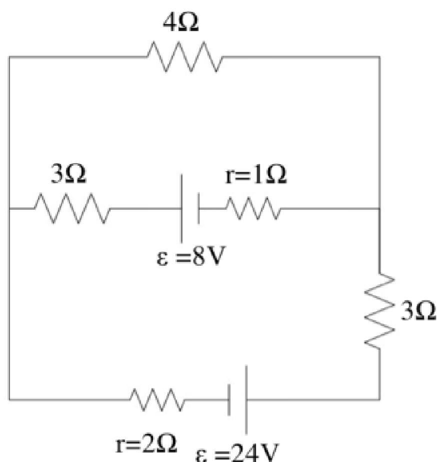
החוק השני של קירכהוף מבוסס על חוק שימור האנרגיה.

חוקי הסימנים לחוק השני

- ערכי הכא"מים ייחשבו חיוביים, אם כיוון המסלול בתוך מקור המתח הוא מההדק השלילי אל ההדק החיובי, וייחשבו שליליים אם כיוון המסלול בתוך מקור המתח הוא מההדק החיובי אל ההדק השלילי.
- ערכי המתח על נגד ייחשבו חיוביים, אם כיוון הזרם בנגד הוא עם כיוון המסלול, וייחשבו שליליים אם כיוון הזרם בנגד הוא נגד כיוון המסלול.

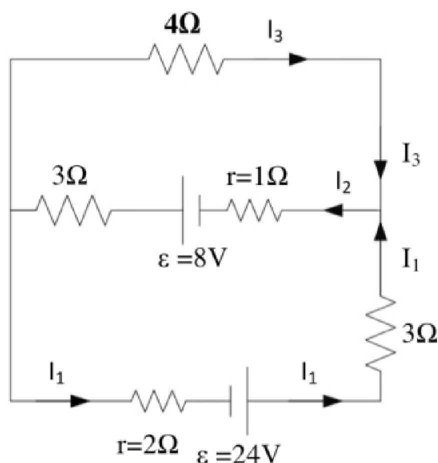
שאלה לדוגמה:

חשבו את הזרם בנגד של ה–4Ω במעגל שלפניכם.



הפתרון:

ראשית נקבע את כיווני הזרמים בכל אחד מהענפים במעגל. אם טעינו בכיוון של הזרם בענף מסוים, נקבל פתרון שלילי בשבילו.



נכתוב שלוש משוואות לשלושת הזרמים (בבחינת הבגרות בדרך כלל לא נדרש פתרון של מערכת של שלוש משוואות):

משוואה ראשונה לפי החוק הראשון של קירכהוף – חוק הצומת:

$$I_2 = I_1 + I_3$$

משוואה שנייה לפי החוק השני של קירכהוף במסלול הסגור סביב המעגל התחתון:

$$2I_1 + 3I_1 + I_2 + 3I_2 = 24 + 8$$

נפשט את המשוואה השנייה:

$$5I_1 + 4I_2 = 32$$

משוואה שלישית לפי החוק השני של קירכהוף במסלול הסגור סביב המעגל החיצוני:

$$2I_1 + 3I_1 - 4I_3 = 24$$

נפשט את המשוואה השלישית:

$$5I_1 - 4I_3 = 24$$

נציב את המשוואה הראשונה בשתי המשוואות האחרות, ונקבל מערכת של שתי משוואות:

$$\begin{cases} 5I_1 + 4I_2 = 32 \\ 5I_1 - 4I_3 = 24 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 5I_1 + 4(I_1 + I_3) = 32 \\ 5I_1 - 4I_3 = 24 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} 5I_1 + 4I_1 + 4I_3 = 32 \\ 5I_1 - 4I_3 = 24 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 9I_1 + 4I_3 = 32 \\ 5I_1 - 4I_3 = 24 \end{cases}$$

נחבר את שתי המשוואות ונקבל את הפתרון ל-I_1:

$$14I_1 = 56$$
$$I_1 = 4A$$

נציב במערכת המשוואות:

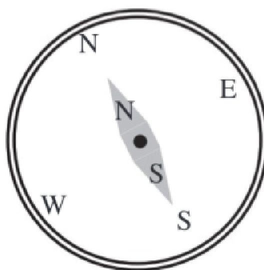
$$5I_1 + 4I_2 = 32$$
$$5 \cdot 4 + 4I_2 = 32$$
$$I_2 = 3A$$
$$I_2 = I_1 + I_3$$
$$3 = 4 + I_3$$
$$I_3 = -1A$$

קיבלנו פתרון שלילי לזרם I_3, לכן כיוון הזרם בענף העליון מנוגד לכיוון שקבענו, כלומר הזרם בנגד של ה-4Ω הוא $1A$ בכיוון שמאלה.

פרק 4 – השדה המגנטי

מגנטים

לכל מגנט יש שני קטבים: דרום – S וצפון – N. עד עתה לא נמצא בטבע מונופול (חד קוטב) מגנטי. מגנט שנמצא על פני הארץ, ויכול להסתובב באופן חופשי, תמיד הקוטב הצפוני שלו יפנה לכיוון צפון (כיוון זה סוטה במעלות בודדות מהקוטב הצפוני הגאוגרפי שנקבע לפי ציר הסיבוב של כדור הארץ). המצפן הוא למעשה מגנט כזה. הוא מבוסס על מחט מגנטית החופשית להסתובב סביב ציר, והקוטב הצפוני שלה מצביע לכיוון צפון.



כוחות בין שני מגנטים

בין שני מגנטים קיימים כוחות של משיכה או דחייה. בדומה לחוק קולון, קטבים זהים דוחים זה את זה, וקטבים מנוגדים מושכים זה את זה.

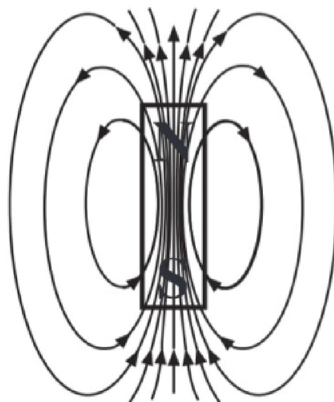
שדה מגנטי – $\vec{B}$

כיוון השדה המגנטי בנקודה: הכיוון שאליו יפנה הקוטב הצפוני של מחט מגנטית קטנה שתוצב בנקודה.

עוצמת השדה נמדדת ביחידות של T – טסלה.

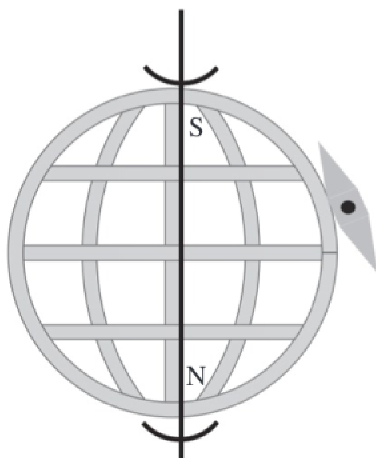
בדומה לשדה החשמלי, גם את השדה המגנטי מתארים בעזרת מודל של קווי שדה. כיוון השדה המגנטי משיק לקו של השדה מגנטי. בניגוד לקווי השדה החשמלי, קווי שדה מגנטי לא מתחילים ולא מסתיימים,

אלא הם תמיד קווים סגורים. מחוץ לגוף המגנט קווי השדה יוצאים מהקוטב הצפוני, ומגיעים אל הקוטב הדרומי של המגנט. בתוך המגנט עצמו, קווי השדה נסגרים מהקוטב הדרומי אל הצפוני. ראו בתרשים שלפניכם:



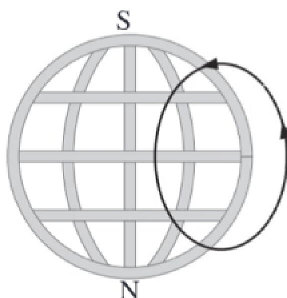
השדה המגנטי של כדור הארץ

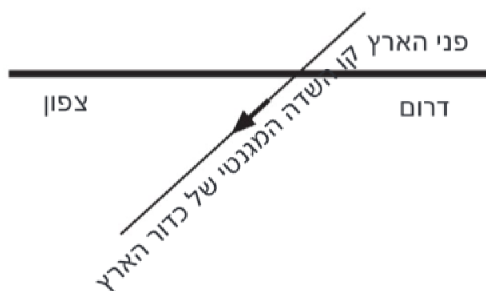
הקוטב הצפוני של מחט המצפן פונה צפונה, וצפון נמשך לדרום, לפיכך נסיק מסקנה מפתיעה: הקוטב המגנטי **הדרומי** של כדור הארץ נמצא בצפון הגאוגרפי, בסמוך לקוטב **הצפוני**, כלומר כדור הארץ הוא מגנט הפוך. ראו בתרשים שלפניכם:

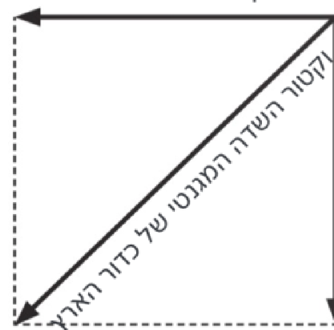


עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ היא בשיעור של $10^{-5}T$.

נתבונן בקו השדה המגנטי של כדור הארץ העובר, למשל, בישראל.







אם נעשה Zoom in, ונסובב את התמונה כך שקו האופק יהיה אופקי, נקבל את התמונה הבאה:

השדה המגנטי אינו מקביל לפני הארץ, אלא הוא אלכסוני כלפי מטה, ונוצרים שני רכיבים, אופקי ואנכי.

עוצמת הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ היא בערך: $\vec{B}_{E\parallel} = 2.9\cdot10^{-5}T$. מחט המצפן מורה על כיוון הרכיב האופקי של השדה המגנטי הארצי.

השדה המגנטי הנוצר על ידי זרמים חשמליים

במקרים רבים מישור הדף אינו מספיק כדי לתאר את כיוון השדה, ויש להגדיר כיוונים נוספים הניצבים לדף:

ההיגיון בסימונים אלה הוא מראה החץ הנע אל הקורא וממנו. מלפנים נראה החץ כעיגול עם חוד במרכזו, ומאחור נראה זנב החץ עם הכנפונים. ראו את החץ בתרשים שלפניכם:





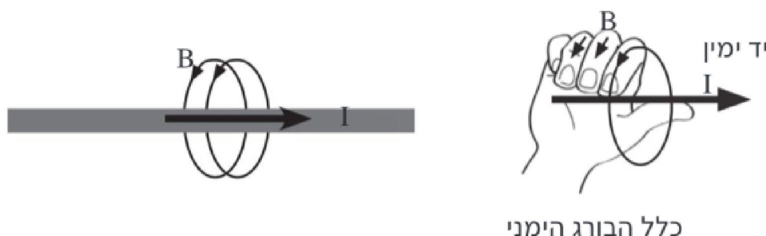
השדה המגנטי בסביבת תיל ישר וארוך הנושא זרם חשמלי

עוצמת השדה המגנטי בנקודה הנמצאת במרחק r מתיל ישר וארוך, הנושא זרם חשמלי I, היא:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

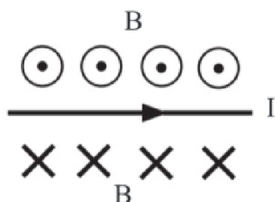
המקדם $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{T \cdot m}{A}$ נקרא הפרמיאביליות של הריק.

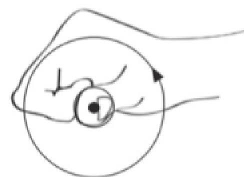
כיוון השדה מאונך למישור המכיל את התיל ואת הנקודה. קווי השדה הם מעגלים המקיפים את התיל בכיוון המוגדר, לפי כלל יד ימין (או כלל הבורג): מציבים את יד ימין, כך שהאגודל מצביע לכיוון הזרם, ושאר האצבעות מראות את כיוון השדה. ראו בתרשים שלפניכם:



כלל הבורג הימני

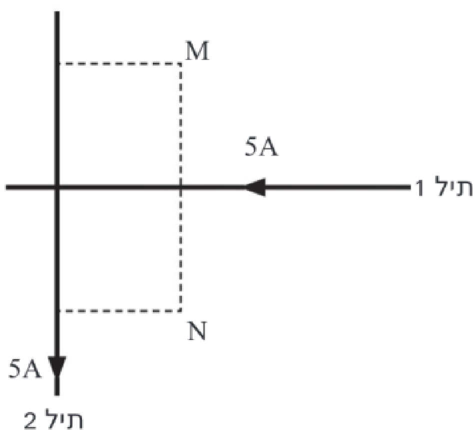
נקודות מבט נוספות הן:





שאלה לדוגמה:

שני תילים מוליכים המאונכים זה לזה, נושאים זרם של 5 אמפר כל אחד, כמתואר בתרשים שלפניכם:



א. מצאו את השדה המגנטי של תיל 1 בנקודות M ו–N, המרוחקות כל אחת 2 סנטימטרים מכל אחד מהתילים.

ב. מצאו את השדה השקול שיוצרים שני הזרמים בנקודות M ו–N.

הפתרון:

א. נמצא את השדה המגנטי של תיל 1 בנקודה M:

לפי כלל הבורג הימני, כיוון השדה הוא לתוך הדף ✕ B_1. נחשב את עוצמת השדה:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5}{2\pi \cdot 0.02} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 5}{0.02} = 5 \cdot 10^{-5}\,T$$

עוצמת השדה של תיל 1 בנקודה M היא $5 \cdot 10^{-5}$ טסלה, וכיוונו לתוך הדף.

נמצא את השדה המגנטי של תיל 1 בנקודה N:

נקודה N נמצאת מצדו האחר של תיל 1, ולפי כלל הבורג הימני, כיוון השדה הוא מתוך הדף:

⊙ B_1. עוצמת השדה שווה לזו שבנקודה M, כי הנקודות במרחק שווה מהתיל.

ב. תיל 2 יוצר בשתי הנקודות שדה מגנטי, אשר לפי כלל הבורג הימני, כיוונו הוא מתוך הדף ⊙,

וגודלו $5 \cdot 10^{-5}T$. לכן בנקודה M השדה מתאפס, ובנקודה N השדה מוכפל:

$$\bar{B}_M = 0 \quad : \quad \bar{B}_N = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 10^{-4}\,T$$

השדה המגנטי במרכזה של כריכה מעגלית נושאת זרם

אפשר לדעת את השדה במרכזה של הכריכה בלבד:

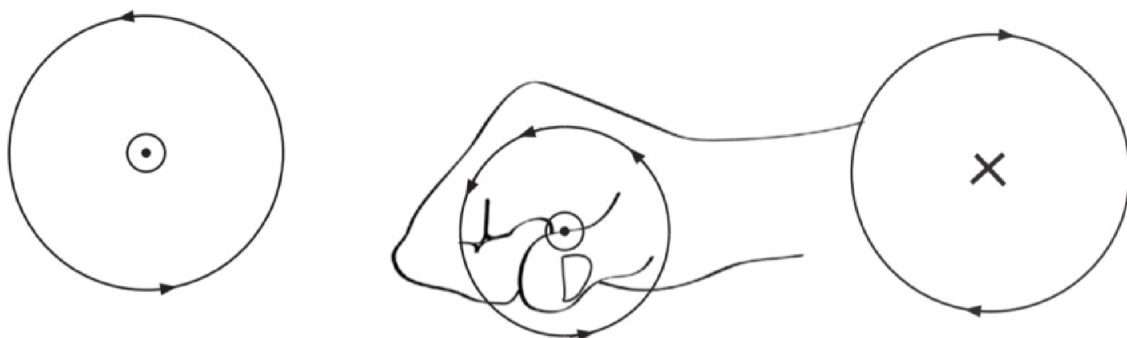
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

כאשר:

B – השדה המגנטי בטסלה (T)

R – רדיוס הכריכה במטרים (m)

I – הזרם בכריכה באמפר (A)



גם כאן קובעים את כיוון השדה לפי כלל הבורג, אלא שבמקרה זה האגודל מצביע לכיוון השדה, והאצבעות לכיוון הזרם.

כיוון השדה הוא מתוך הדף, כאשר הזרם הוא נגד כיוון השעון, ולתוך הדף כאשר הזרם הוא עם כיוון השעון.

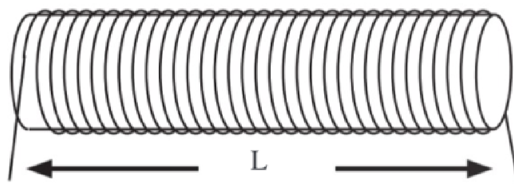
סליל מעגלי דק

סליל מעגלי דק הוא מספר כריכות זהות הסובבות סביב מרכז משותף. התיל דק, לכן עובי הסליל קטן מאוד יחסית לרדיוסו. השדה המגנטי שבמרכז הסליל שווה לשדה של כריכה אחת כפול מספר הכריכות – N.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R}$$

שדה מגנטי בתוך סילונית ארוכה

סילונית היא תיל הכרוך סביב גליל בצפיפות כריכות אחידה. כל כריכה של התיל מתקדמת מרחק שווה לאורך הגליל,

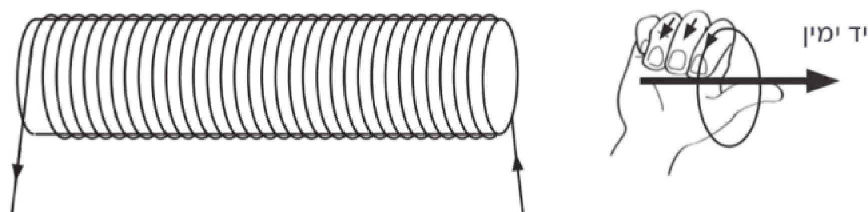


כך שנוצר סליל שקוטרו קטן מאוד ביחס לאורכו.

צפיפות הכריכות n היא מספר הכריכות למטר:

$$n = \frac{N}{L}$$

השדה המגנטי בתוך הסילונית (רחוק מהקצוות) הוא אחיד, כיוונו נקבע לפי כיוון השדה של כריכה אחת, האגודל מצביע לכיוון השדה, והאצבעות לכיוון הזרם בכריכות. ראו בתרשים שלפניכם:



עוצמת השדה היא:

$$B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{NI}{L}$$

כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי

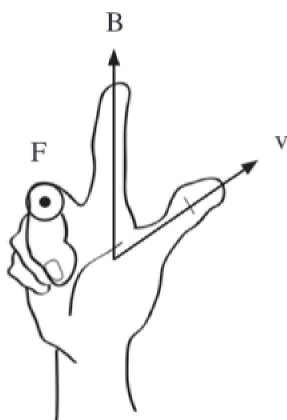
על גוף טעון הנמצא במנוחה בשדה מגנטי, לא יפעל כוח מגנטי. כדי שגוף יושפע מהשדה המגנטי, הוא צריך לשאת מטען חשמלי, ועליו גם לנוע במהירות שאינה מקבילה לקווי השדה. גודלו של הכוח הפועל על גוף טעון הנע בשדה מגנטי $\vec{B}$, במהירות $\vec{v}$, הוא:

$$|\vec{F}| = q \cdot |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin\alpha$$

כאשר a היא הזווית בין כיוון המהירות לכיוון השדה. כוח זה נקרא **כוח לורנץ**. כיוון הכוח מאונך הן למהירות והן לשדה, כלומר הוא מאונך למישור המכיל את שני הווקטורים. כדי לקבוע את כיוון הכוח משתמשים בכלל יד ימין:

כלל יד ימין

למטען חיובי מכוונים את האגודל לכיוון המהירות, ואת האצבע המורה לכיוון השדה. מכופפים את האמה בזווית ישרה, והיא מצביעה לכיוון הכוח. ראו בתרשים שלפניכם:



כלל יד ימין

למטען שלילי אפשר פשוט להפוך את כיוון הכוח, או להשתמש ביד שמאל.

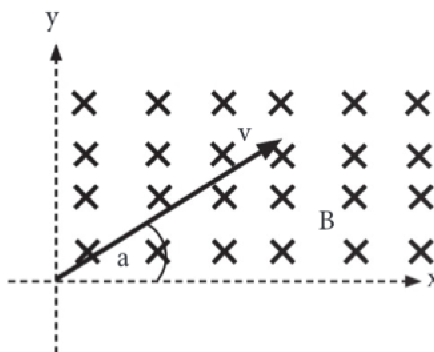
אפשרות אחרת: האגודל מכוון לכיוון המהירות, שאר האצבעות בכיוון השדה המגנטי, הכוח הפועל על מטען חיובי יוצא מכף היד, והכוח הפועל על מטען שלילי יוצא מגב היד.

הגדרת יחידת השדה המגנטי טסלה

לפי כוח לורנץ אפשר להגדיר את היחידה טסלה, המופיעה להלן:
טסלה אחד הוא עוצמתו של שדה מגנטי, המפעיל כוח של ניוטון אחד, על מטען של קולון אחד, הנע במהירות של מטר אחד לשנייה, בכיוון מאונך לכיוון השדה המגנטי. בהמשך נלמד הגדרה נוספת.

שאלה לדוגמה:

גוף זעיר טעון במטען שלילי $q=-6\cdot10^{-5}\text{C}$, נע במהירות $v=500\frac{\text{m}}{\text{s}}$, בשדה מגנטי אחיד $B=2\cdot10^{-3}\text{T}$, כמתואר בתרשים שלפניכם.



מצאו את גודלו ואת כיוונו של הכוח הפועל עליו.

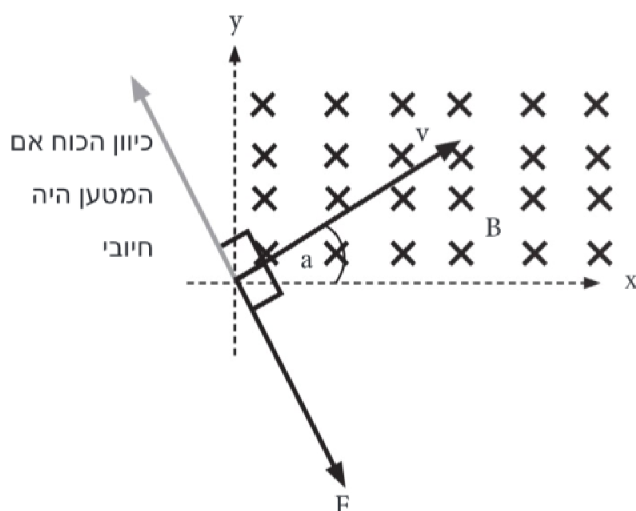
הפתרון:

הזווית בין כיוון המהירות לכיוון השדה היא בת 90°. (a היא ביחס לציר x).

נחשב את גודלו של הכוח (נציב את המטען בערכו המוחלט):

$$\left|\vec{F}\right| = |q| \cdot \left|\vec{v}\right| \cdot \left|\vec{B}\right| \cdot \sin 90^\circ = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 500 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 6 \cdot 10^{-5} \text{N}$$

נקבע את כיוון הכוח לפי כלל יד ימין. האמה מצביעה לכיוון הרביע השני של מערכת הצירים, אנכית למהירות ולשדה. מכיוון שהמטען שלילי, נהפוך את הכיוון ונקבל את כיוון הכוח. ראו בתרשים שלפניכם:



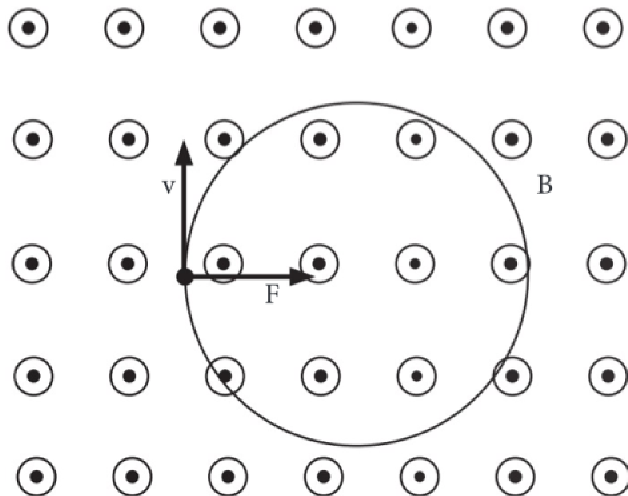
תנועת מטען בשדה מגנטי אחיד

גוף טעון הנכנס במהירות לאזור שבו שורר שדה מגנטי אחיד, יפעל עליו כוח מגנטי בניצב לכיוון מהירותו. כוח הניצב למהירות לא מבצע עבודה. המסקנה היא שהכוח לא משנה את גודל המהירות אלא רק את כיוונה, כמו כן גם גודלו של הכוח לא משתנה.

תנועה מעגלית

כאשר הגוף נכנס לאזור שבו שורר שדה מגנטי אחיד, כשכיוון מהירותו ניצב לכיוון השדה, הוא ינוע בתנועה מעגלית קצובה. מכאן שכוח לורנץ הוא סוג של כוח צנטריפטלי. מגמת הסיבוב נקבעת לפי כלל

יד ימין, כך שכיוון הכוח הוא כלפי מרכז המעגל. בתרשים שלפניכם נראה את מסלול תנועתו של חלקיק חיובי בהשפעת שדה מגנטי אחיד, שכיוונו מתוך הדף.



נקבל את רדיוס המסלול המעגלי לפי כוח לורנץ והחוק השני של ניוטון (נזכור שהתאוצה בתנועה מעגלית קצובה היא $a_C = \omega^2 R = \frac{v^2}{R}$):

$$F = ma$$

$$q\not{v}B = m\frac{v^{\not{2}}}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

נמצא גם ביטויים לזמן המחזור ולמהירות הזווית:

$$\not{v} = \omega R = \omega\frac{m\not{v}}{qB}$$

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

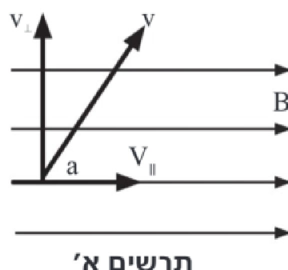
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\frac{m}{qB}$$

קיבלנו תוצאה מפתיעה: זמן המחזור והמהירות הזוויתית אינם תלויים במהירות וברדיוס המסלול.

הערה: הביטויים לרדיוס המסלול, לזמן המחזור ולמהירות הזוויתית אינם נוסחה מוסכמת, ויש להראות את הפיתוח כפי שמוצג למעלה.

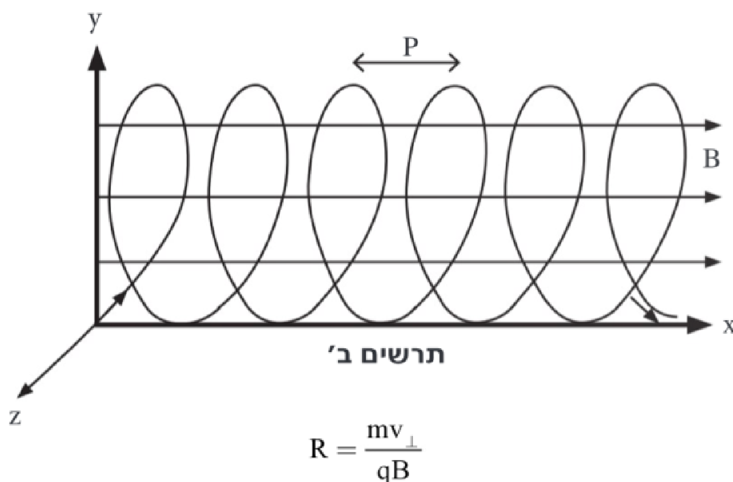
תנועה בורגית

תנועה בורגית נוצרת כאשר הגוף הטעון נכנס לאזור שבו שורר שדה מגנטי אחיד, כך שכיוון מהירותו בזווית לכיוון השדה. נפרק את וקטור המהירות לשני רכיבים: אחד מקביל לשדה המגנטי: $v_{\parallel} = v\cos\alpha$, ואחד ניצב לשדה המגנטי: $v_{\perp} = v\sin\alpha$. ראו תרשים א׳: תנועת הגוף היא חיבור של שתי תנועות (ראו תרשים ב׳):



תרשים א׳

- תנועה במהירות קבועה $v_{\parallel}$ בכיוון המקביל לשדה, בכיוון ציר x בתרשים.
- תנועה מעגלית במישור הניצב לשדה – מישור xy. רדיוס המעגל הוא:



תרשים ב׳

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

ההתקדמות של החלקיק בכיוון ציר x במהלך סיבוב שלם נקראת פסיעה – P. נמצא ביטוי לפסיעה:

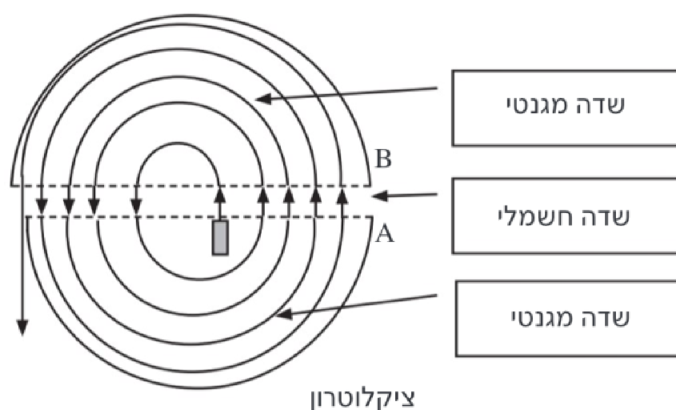
$$P = v_{\parallel}T = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

גם ביטוי זה אינו נוסחה מוסכמת, ויש להראות את דרך פיתוחו.

יישומים של הכוח המגנטי

ציקלוטרון

הציקלוטרון הוא מתקן להאצת חלקיקים. הוא בנוי משני חצאי עיגול שבתוכם החלקיקים נעים בתנועה מעגלית בהשפעת שדה מגנטי אחיד. בין חצאי העיגול קיים אזור שבו שדה חשמלי מתחלף. החלקיקים (בדרך כלל פרוטונים, דיוטרונים או חלקיקי אלפא) נכנסים לשדה החשמלי, מואצים בקו ישר, ורוכשים כמות של אנרגיה קינטית השווה
ל- $\Delta E_k = qV_{AB}$. בשני חצאי העיגול קיים שדה מגנטי חזק. כבר למדתם כי הכוח בשדה המגנטי לא מבצע עבודה על החלקיקים, אלא גורם להם לנוע בחצי מעגל במהירות קבועה, ומחזיר אותם לשדה החשמלי. בינתיים השדה החשמלי מתחלף בתיאום זמנים מדויק, והחלקיקים מואצים שוב, הפעם בכיוון ההפוך, ועוברים לחצי העיגול האחר. בכל פעם שהחלקיקים עוברים את השדה החשמלי, הם מקבלים את אותה מנת אנרגיה $\Delta E_k = qV_{AB}$. לכן מהירותם גדלה, ולכן גדל גם רדיוס הסיבוב. בסוף תהליך ההאצה, החלקיקים מגיעים לרדיוס המרבי ולמהירות המרבית, ויוצאים מהמתקן. עקרון הפעולה של הציקלוטרון מנצל את העובדה שתדירות ההחלפה של השדה החשמלי קבועה, ואינה תלויה ברדיוס המסלול (בהנחה שהמרווח בין שני חצאי העיגול קטן מאוד, וזמן מעבר החלקיקים בו זניח ביחס לזמן המחזור). עובדה זו נכונה כל עוד מהירות החלקיקים לא מגיעה לסדר הגודל של מהירות האור. לפי תורת היחסות במהירויות הקרובות למהירות האור, מסת החלקיקים גדלה, התדירות משתנה, והסנכרון משתבש. זו גם המגבלה העיקרית של הציקלוטרון.



ציקלוטרון

שאלה לדוגמה:

השדה המגנטי בציקלוטרון הוא 0.1 טסלה, והפרש הפוטנציאלים המתחלף בין שני החלקים הוא 8,000 וולט. פרוטונים מואצים בציקלוטרון למהירות של $v = 1.2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$.

א. מה רדיוס הציקלוטרון (רדיוס המעגל המרבי של תנועת הפרוטונים)?

ב. מה תדירות ההחלפה של השדה החשמלי? משך הזמן של תנועת הפרוטונים בשדה החשמלי הוא זניח.

ג. כמה פעמים עברו הפרוטונים את השדה החשמלי? כמה סיבובים הם השלימו?

הפתרון:

מטען הפרוטון הוא:

$$q_p = +e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$

נמצא בנוסחאון את המסה של הפרוטון:

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} Kg$$

א. נחשב את הרדיוס לפי המהירות הסופית:

$$F = ma$$

$$q_p \not{v} B = m \frac{v^{\not{2}}}{R}$$

$$R = \frac{m_p v}{eB} = \frac{1.67 \cdot 10^{-27} \cdot 1.2 \cdot 10^{7}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1} = 1.25\text{m}$$

רדיוס הציקלוטרון הוא 1.25 מטר.

ב. ראשית, נמצא את זמן המחזור:

$$\not{v} = \omega R = \omega \frac{m\not{v}}{qB}$$

$$\omega = \frac{q_p B}{m_p}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \frac{m_p}{q_p B} = 2\pi \frac{1.67 \cdot 10^{-27}}{1.6 \cdot 10^{-19} 0.1} = 6.56 \cdot 10^{-7}\text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = 1.52 \cdot 10^{6}\text{Hz} = 1.52\text{MHz}$$

התדירות היא 1.52MHz.

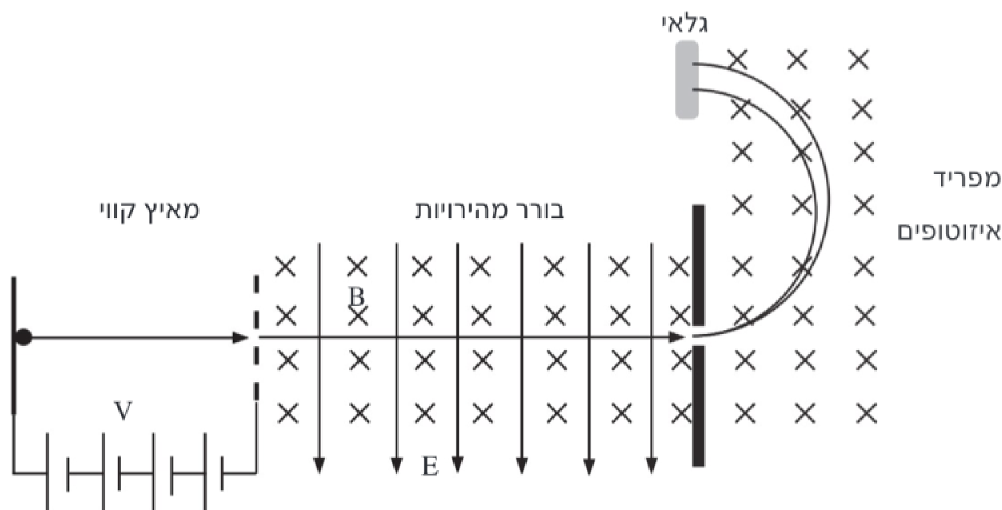
ג. מספר המעברים שווה לאנרגיה הקינטית הסופית שקיבלו הפרוטונים, לחלק במנת האנרגיה שהם קיבלו בכל מעבר:

$$N = \frac{E_K}{\Delta E_k} = \frac{\frac{1}{2} m_p v^2}{q_p V} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \cdot \left(1.2 \cdot 10^{7}\right)^2}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 8{,}000} = 94$$

הפרוטונים עברו 94 פעמים את השדה החשמלי. בכל סיבוב הם עוברים פעמיים, לכן הם השלימו 47 סיבובים.

ספקטרוגרף מסות

ספקטרוגרף המסות הוא מתקן להפרדה בין איזוטופים שונים של אותו יסוד, או למציאת מסות של מולקולות לא ידועות. הספקטרוגרף בנוי משלושה חלקים. ראו בתרשים שלפניכם:



תיאור סכמתי של ספקטרוגרף מסות

חלק ראשון – מאיץ קווי

כדי להאיץ את האיזוטופים מקלפים אותם מאלקטרון חיצוני, כך שהם הופכים ליונים חיוביים. במאיץ הקווי האיזוטופים מואצים בהפרש פוטנציאלים V. מהירות האיזוטופים בסוף תהליך ההאצה מחושבת לפי הפרש הפוטנציאלים:

$$qV = \frac{1}{2}mv^2$$

חלק שני – בורר מהירויות

תפקיד בורר המהירויות הוא להבטיח שכל האיזוטופים יגיעו למפריד האיזוטופים במהירות זהה. בבורר קיימים שדה מגנטי ושדה חשמלי המאונכים זה לזה. האיזוטופים נכנסים לבורר בכיוון מאונך לשני השדות, וכדי שהם ינועו בקו ישר צריך להתקיים שוויון בין הכוח המגנטי הפועל עליהם לבין הכוח החשמלי:

$$F_B = F_E$$

$$\cancel{q}vB = \cancel{q}E$$

$$v = \frac{E}{B}$$

רק האיזוטופים הנעים במהירות זו יעברו אל מפריד האיזוטופים.

חלק שלישי – מפריד האיזוטופים

בחלק זה של המתקן קיים רק שדה מגנטי. האיזוטופים הטעונים במטען חשמלי זהה מופרדים עקב מסתם השונה, כי רדיוס המסלול תלוי במסה:

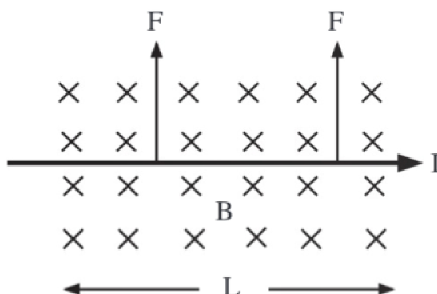
$$F = ma$$

$$qvB = m\frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

איזוטופים בעלי מסה שונה פוגעים בגלאי בנקודות שונות, ולפי המרחק מנקודת הכניסה לשדה המגנטי אפשר לחשב את המסה.

הכוח הפועל על תיל נושא זרם הנמצא בשדה מגנטי



הכוח הפועל על תיל נושא זרם הנמצא בשדה מגנטי אחיד, הוא הכוח הכולל הפועל על כל המטענים הזורמים בתיל. הביטוי לגודלו ולכיוונו של הכוח דומה לזה של הכוח על מטען הנע בשדה מגנטי.

גודלו של הכוח הוא:

$$F = IBL\sin\alpha$$

כאשר:

F – הכוח הפועל על התיל ב-N

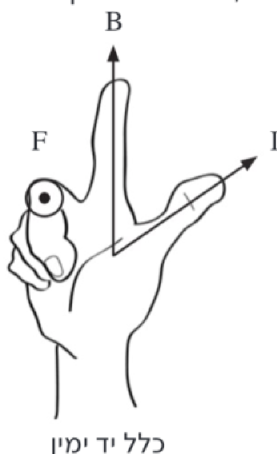
I – הזרם בתיל ב-A

B – השדה המגנטי ב-T

L – אורך התיל הנמצא בתוך השדה ב-m

a – הזווית בין כיוון הזרם לבין כיוון השדה המגנטי

כיוון הכוח מאונך לכיוון הזרם ולכיוון השדה, לפי כלל יד ימין:



כלל יד ימין

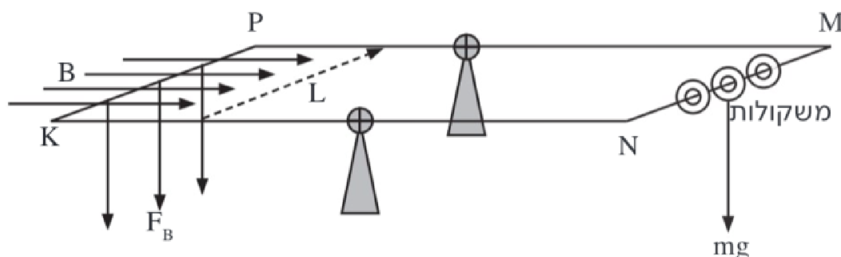
הערה: במציאות הכוח פועל על האלקטרונים, אך את כיוונו בודקים לפי הגדרת כיוון הזרם, כאילו המטענים החיוביים נעים.

הגדרת יחידת השדה המגנטי טסלה

טסלה אחד הוא עוצמתו של שדה מגנטי, המפעיל כוח של ניוטון אחד, על תיל שאורכו מטר אחד, שזורם בו זרם של אמפר אחד, בכיוון מאונך לכיוון השדה.

דוגמה: מאזני זרם

המערכת הבאה נקראת מאזני זרם. המסגרת KPMN נושאת זרם ונמצאת בשיווי משקל. על הצלע MN מניחים משקולות, והצלע KP נמצאת בשדה מגנטי B, שכיוונו מקביל לצלע המסגרת KN ומאונך לצלע KP. מקור המתח לא נראה בתרשים שלפניכם.



משקל המשקולות, mg, בצד אחד של המאזניים, מתאזן על ידי הכוח המגנטי הפועל על הצלע KP בכיוון מטה. לפי כלל יד ימין, כיוון הזרם הוא מ–K ל–P. כדי למצוא את כיוון הזרם מכוונים את האצבע המורה לכיוון השדה, ואת האמה למטה (לכיוון הכוח). במצב זה האגודל יצביע לכיוון הזרם.

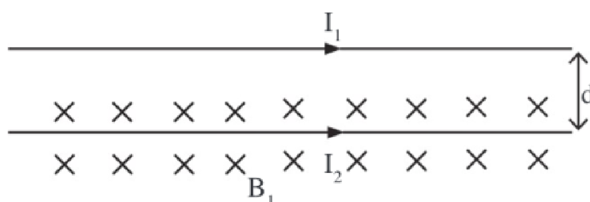
במצב של שיווי משקל מתקיים:

$$F_B = mg$$

$$IBL = mg$$

הכוח ליחידת אורך שמפעילים זה על זה שני תילים נושאי זרם

שני תילים נושאי זרם, ארוכים ומקבילים, מפעילים כוח זה על זה. בתרשים שלפניכם נראים שני תילים מקבילים נושאי זרם I_1 ו– I_2, שאורכם L, והמרחק ביניהם הוא d ‏(d = L). התיל I_1 יוצר סביבו שדה מגנטי B_1 והתיל I_2, מושפע מהשדה.



נחשב את השדה B_1 שיוצר התיל I_1 בסביבת התיל I_2:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

נחשב את גודל הכוח:

$$F = I_2 B_1 L = I_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} L = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} L$$

לכן גודל הכוח ליחידת אורך הוא:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

כיוון הכוח לפי כלל יד ימין הוא למעלה, לכיוון התיל I_1.

אם נאמר ההפך, שהתיל I_2 יוצר סביבו שדה מגנטי B_2, והתיל I_1 מושפע מהשדה, יהיה הכוח זהה בגודלו לכוח שקיבלנו, וכיוונו יהיה למטה. מצב זה תואם את החוק השלישי של ניוטון, כלומר התילים יימשכו זה לזה בכוח שווה. במקרה שכיווני הזרמים מנוגדים, יתקבל כוח דחייה הדדי באותו גודל.

הגדרת האמפר

נציב את ערכו של הקבוע $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ בנוסחת הכוח:

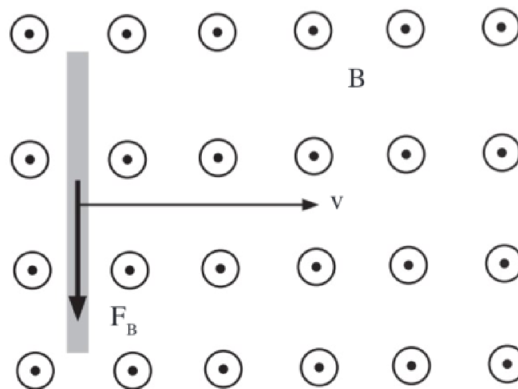
$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} I_1 I_2}{2\pi d} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{d}$$

האמפר נקבע לפי נוסחה זו, כך שהמקדם יהיה בדיוק $2 \cdot 10^{-7}$, לכן ההגדרה המקובלת לאמפר היא: אמפר אחד הוא הזרם הזורם בכל אחד משני תילים דקים, ארוכים ומקבילים, המרוחקים מטר אחד זה מזה, כך שהכוח הפועל ביניהם על כל מטר של תיל יהיה $2 \cdot 10^{-7}$ ניוטון.

פרק 5 – השראה אלקטרומגנטית

כא"מ מושרה בין קצותיו של מוליך הנע בשדה מגנטי

במוט מוליך הנע בשדה מגנטי, במהירות שיש לה רכיב ניצב לשדה, נוצר כא"מ בגלל הכוח המגנטי הפועל על המטענים החופשיים בתוך המוט. כא"מ זה נקרא כא"מ מושרה. כדי שייווצר כא"מ זה, נניח לשם הפשטות שהמוט נע כשהוא מאונך למהירות. ראו בתרשים שלפניכם:



החץ F_B הוא בכיוון הכוח המגנטי, הפועל על מטען חיובי. אם המוט הוא חלק ממעגל סגור, זה יהיה כיוון הזרם במוט (בפועל יהיה הזרם של אלקטרונים חופשיים הנעים בכיוון מנוגד).

גודל הכא"מ הוא:

$$\varepsilon = vB_{\perp}L_{\perp}$$

כאשר:

e – הכא"מ הנוצר לאורך המוט בוולט.

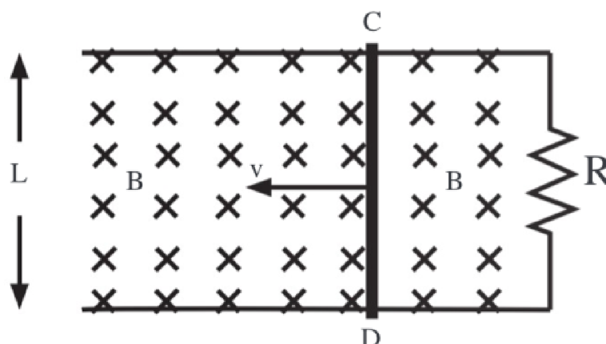
v – מהירות המוט במטרים לשנייה.

$L_{\perp}$ – היטל התיל הניצב למהירות.

$B_{\perp}$ – רכיב השדה המגנטי הניצב למישור התנועה (המישור המכיל את המוט ואת וקטור המהירות).

שאלה לדוגמה:

מוט מוליך CD שאורכו $L = 0.4m$, נע במהירות $v = 6\frac{m}{s}$, על שתי מסילות מוליכות, המחוברות באמצעות נגד $R = 0.2\Omega$, כך שבכל רגע נוצר מעגל סגור. המערכת נמצאת כולה בשדה מגנטי $B = 0.05T$, שכיוונו לתוך הדף. ההתנגדות של המוט והמסילות זניחה. ראו בתרשים שלפניכם:



א. חשבו את הזרם שנוצר במוט. האם כיוון הזרם הוא מ-C ל-D או מ-D ל-C?

ב. האם דרוש כוח כדי להניע את המוט במהירות קבועה? אם כן, מהו גודלו ומהו כיוונו? אם לא, נמקו.

ג. חשבו את ההספק המתפתח בנגד. מהו מקור האנרגיה להספק זה?

הפתרון:

א. במעגל הסגור נוצר זרם בזכות הכא"מ המושרה: $\varepsilon = vBL$. נחשב את הזרם לפי חוק אוהם:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBL}{R} = \frac{6 \cdot 0.05 \cdot 0.4}{0.2} = 0.6A$$

נמצא את כיוון הזרם לפי הכוח הפועל על מטען חיובי במוט. נשתמש בכלל יד ימין: האגודל מצביע שמאלה לכיוון המהירות, האצבע מצביעה לתוך הדף לכיוון השדה. במצב זה האמה מצביעה למטה, כלומר כיוון הזרם הוא מ-C ל-D.

ב. דרוש כוח כדי להניע את המוט במהירות קבועה. הסבר: המוט הוא למעשה תיל נושא זרם הנמצא בשדה מגנטי, לכן פועל עליו כוח מגנטי:

$$F = IBL = 0.6 \cdot 0.05 \cdot 0.4 = 0.012N$$

כיוון הכוח, לפי כלל יד ימין, הוא ימינה, נגד כיוון התנועה של המוט.

הערה: כיוון הכוח חייב להיות נגד כיוון המהירות, שאם לא כן, היה המוט מאיץ גם ללא התערבות חיצונית, בניגוד לחוק שימור האנרגיה. זה אחד ההיבטים של חוק לנץ, המופיע בהמשך.

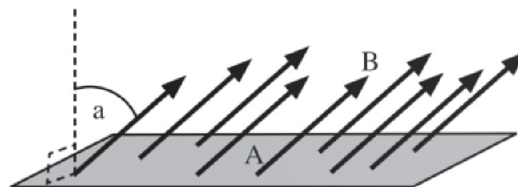
ג. נחשב את ההספק:

$$P = I^2R = 0.6^2 \cdot 0.2 = 0.072W$$

מקור האנרגיה הוא עבודת הכוח הפועל נגד הכוח המגנטי, כדי להניע את המוט במהירות קבועה.

שטף מגנטי

השטף של שדה דרך משטח מייצג את מספר קווי השדה העוברים דרך המשטח. השטף של שדה מגנטי אחיד דרך משטח מישורי, הוא מכפלת רכיב השדה המגנטי המאונך למשטח – $B_\perp$, בשטח A:



$$\Phi_B = B_\perp A = B \cdot A \cdot \cos\alpha$$

יחידת המידה של השטף המגנטי היא: $T \cdot m^2$ הנקראת גם וובר – Wb.

כא"מ מושרה – חוק פאראדיי

חוק פאראדיי, על שמו של המדען האנגלי מייקל פאראדיי (1867–1791), קושר את קצב שינוי השטף דרך מסגרת מוליכה לכא"מ הנוצר בה. קיום שטף מגנטי דרך המסגרת לא יוצר בה כא"מ, אבל **שינוי** של השטף, יגרום כא"מ מושרה וזרם מושרה במסגרת.



הכא"מ המושרה הנוצר במסגרת מוליכה, שווה לקצב השינוי בשטף המגנטי דרך המסגרת.

כא"מ מושרה ממוצע

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

סימן המינוס קשור לחוק לנץ, שיוסבר בהמשך. למעשה, אפשר להתעלם מהמינוס ולחשב את עוצמת הכא"מ המושרה בערכה המוחלט. את כיוון הזרם המושרה מוצאים משיקולים אחרים כפי שנראה בהמשך.

שינוי בשטף המגנטי יכול להיווצר על ידי שינוי של גורם אחד בנוסחה או יותר:

- שינוי של עוצמת השדה המגנטי.
- שינוי שטח המסגרת שדרכו עובר השדה המגנטי.
- שינוי הזווית בין השדה לאנך למשטח.

כא"מ מושרה בסליל

כאשר סליל בעל N כריכות נמצא בשדה מגנטי, הכא"מ הנוצר בין קצות הסליל שווה לכא"מ הנוצר בכריכה אחת, כפול מספר הכריכות:

$$\bar{\varepsilon} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

כא"מ מושרה רגעי

דרך אחת לקבל את הכא"מ המושרה הרגעי היא לפי גרף של השטף המגנטי כפונקציה של הזמן. הכא"מ שווה לשיפוע הגרף (בערכים מוחלטים).

דרך נוספת היא באמצעות נגזרת. מביעים את השטף באמצעות הזמן, כלומר מנסחים את הפונקציה $\Phi(t)$. גוזרים את הפונקציה, כשמשתנה הגזירה הוא הזמן, ומקבלים את הכא"מ המושרה. זה המקום היחיד כמעט, שבו נדרש שימוש בחשבון דיפרנציאלי בבחינת הבגרות בפיזיקה.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

גם כאן יש להכפיל במספר הכריכות, אם מדובר בכא"מ רגעי בסליל בעל N כריכות:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

חוק לנץ

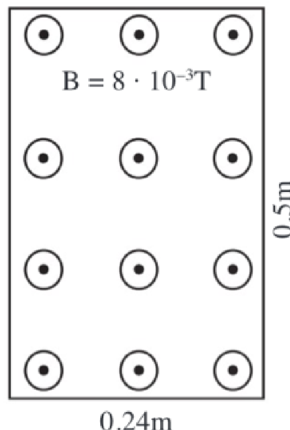
חוק לנץ משמש אותנו למציאת כיוון הזרם המושרה, הנוצר במסגרת מוליכה עקב שינוי בשטף המגנטי, הגדלת השטף או הקטנתו.

חוק לנץ: שינוי בשטף מגנטי יוצר כא"מ מושרה, היוצר זרם מושרה. הזרם המושרה יוצר שדה מגנטי מושרה, ונוצר שטף חדש. **השטף החדש מנוגד לשינוי בשטף שיצר אותו.**

חוק לנץ מבוסס על חוק שימור האנרגיה. אילו היה שינוי בשטף יוצר שינוי שמחזק אותו, היה הזרם המושרה גדל מעצמו, והייתה נוצרת אנרגיה יש מאין.

שאלות לדוגמה:

1. מסגרת מלבנית מוליכה נמצאת בשדה מגנטי, כמתואר בתרשים שלפניכם:



א. חשבו את השטף המגנטי דרך המסגרת.

ב. מה הכא"מ המושרה הנוצר במסגרת במצב זה?

מקטינים בהדרגה את השדה המגנטי (עד התאפסותו), בתהליך שנמשך שתי מאיות השנייה.

ג. מצאו את הכא"מ המושרה הממוצע, הנוצר במסגרת בתהליך הכיבוי.

ד. נתונה התנגדות המסגרת: $R = 0.03\Omega$. חשבו את הזרם המשרה במסגרת. מהו כיוון הזרם, בכיוון תנועת מחוגי השעון או נגד תנועתם?

הפתרון:

א. השדה המגנטי מאונך למישור המסגרת, לכן הזווית בין השדה לאנך היא 0. שטח המסגרת הוא מכפלת צלעות המלבן: $A = 0.24 \cdot 0.5 = 0.12\text{m}^2$

$$\Phi = B_{\perp} A = B \cdot A \cdot \cos 0 = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0.12 \cdot 1 = 9.6 \cdot 10^{-4}\,\text{Wb}$$

ב. השטף קבוע בזמן, לכן לא נוצר כא"מ במסגרת.

ג. נשתמש בנוסחה של כא"מ ממוצע:

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{0 - 9.6 \cdot 10^{-4}}{0.02} = 0.048\text{V}$$

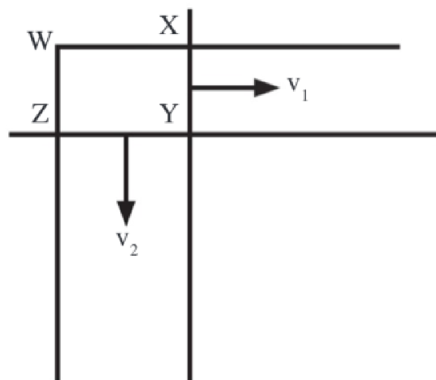
ד. נחשב את הזרם לפי חוק אוהם:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0.048}{0.03} = 1.6\text{A}$$

השינוי בשטף נובע **מהקטנת** השדה המגנטי שכיוונו מחוץ לדף, לכן השדה המגנטי המושרה "ישאף" לבטל את השינוי שיצר אותו, **ויגביר** את השדה המקורי, כלומר השדה המגנטי המושרה יוצא מהדף. לפי חוק הבורג, מגמת הזרם המושרה היא נגד כיוון השעון. נמחיש זאת בתרשים זרימה:



2. מסגרת מוליכה WXYZ נמצאת בשדה מגנטי B, שכיוונו לתוך הדף. המסגרת מורכבת מתיל קבוע XWZ המכופף בזווית ישרה, ומשני מוטות נעים: המוט XY נע ימינה במהירות v_1, והמוט YZ נע למטה במהירות v_2, כך שנוצר בכל רגע מלבן. בזמן x=0 התחילו שני המוטות לנוע מהקודקוד W. ראו בתרשים שלפניכם:



א. הביעו את השטף דרך המסגרת המלבנית כפונקציה של הזמן.

ב. הביעו את הכא"מ הנוצר במסגרת כפונקציה של הזמן.

ג. ההתנגדות הסגולית של שני המוטות היא r, ושטח החתך שלהם הוא S. התנגדות התיל זניחה. הביעו את עוצמת הזרם הזורם במסגרת. מהו כיוון הזרם בתיל?

הפתרון:

א. ראשית נמצא את צלעות המלבן: המוט XY החל לנוע ימינה מ-W במהירות v_1, לכן אורך הצלע XW הוא:

$$XW = v_1 t$$

ובאותו אופן נקבל:

$$WZ = v_2 t$$

שטח המסגרת A הוא מכפלת צלעות המלבן:

$$S = v_1 t \cdot v_2 t = v_1 v_2 t^2$$

נמצא את השטף:

$$\Phi_B = B_\perp A = B \cdot A \cdot \cos\alpha = Bv_1v_2t^2 \cos 90^\circ = Bv_1v_2t^2$$

ב. כדי לקבל את הכא"מ, נשתמש בחוק פאראדיי, ונגזור את פונקציית השטף שמצאנו:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -Bv_1v_2 \cdot 2t = -2Bv_1v_2 \cdot t$$

ג. אורך המוטות הוא: $XW = v_1t$ ו- $WZ = v_2t$.

נוסחת ההתנגדות של מוט מוליך היא: $R = \frac{\rho L}{S}$. השתמשנו כאן ב-S לשטח החתך, כדי לא לבלבל עם שטח המסגרת A.

התנגדות המסגרת היא סכום ההתנגדויות של המוטות:

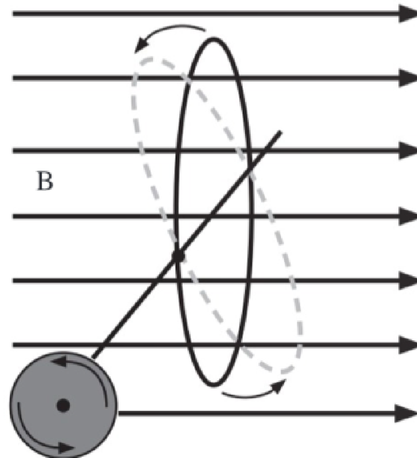
$$R_t = R_{XW} + R_{WZ} = \frac{\rho v_1 t}{S} + \frac{\rho v_2 t}{S} = \frac{\rho\left(v_1 + v_2\right)t}{S}$$

נמצא את הזרם במסגרת:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_t} = -\frac{2 \cdot B \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot t}{\frac{\rho\left(v_1 + v_2\right)t}{S}} = -\frac{2 \cdot S \cdot B \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot t}{\rho\left(v_1 + v_2\right)t} = -\frac{2SBv_1v_2}{\rho\left(v_1 + v_2\right)}$$

כיוון הזרם נקבע לפי חוק לנץ: הגדלת השטח של המסגרת גורמת הגדלת השטף של השדה המגנטי, שכיוונו לתוך הדף. לכן הזרם המושרה ייצור שדה מגנטי שכיוונו החוצה מהדף, הפוך לכיוון השדה המקורי. לפי כלל הבורג, כיוון הזרם הוא נגד כיוון תנועת מחוגי השעון, כלומר הזרם בתיל הוא: $X \leftarrow W \leftarrow Z$.

3. סליל בעל 1,000 ליפופים, שרדיוסו 3 סנטימטרים, מסתובב בשדה מגנטי שגודלו 0.06 טסלה, במהירות זוויתית קבועה: $\omega = 120\frac{\text{Rad}}{\text{sec}}$. בזמן $t = 0$ היה השדה המגנטי מאונך למישור הסליל. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מצאו ביטויים לשטף דרך הסליל כפונקציה של הזמן, ולכא"מ בין קצותיו.

ב. מהו המכשיר המתואר בשאלה?

הפתרון:

א. בזמן $t = 0$ האנך למישור הסליל יוצר זווית $\theta_0 = 0°$ עם השדה המגנטי. האנך מסתובב עם הסליל במהירות זוויתית קבועה w, לכן הזווית θ בין האנך לשדה בזמן t היא: $\theta = \omega t$. נחשב את השטף:

$$\Phi_B = B_\perp A = B \cdot A \cdot \cos\alpha = B \cdot \pi R^2 \cdot \cos(\omega t)$$

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B \cdot \pi R^2 \cdot (-\sin(\omega t) \cdot \omega)$$

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = \omega N \cdot B \cdot \pi R^2 \sin(\omega t)$$

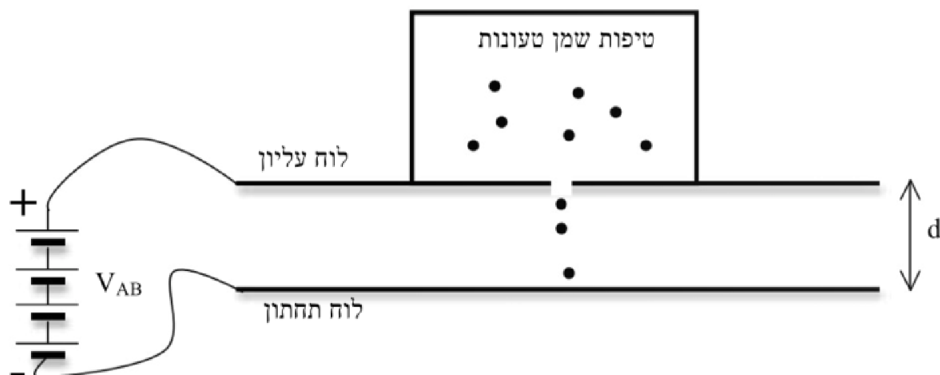
$$\varepsilon = \omega N \cdot B \cdot \pi R^2 \sin(\omega t) = 120 \cdot 1000 \cdot 0.06 \cdot \pi \cdot 0.03^2 \sin(120t)$$

$$\varepsilon = 20.4 \cdot \sin(120t)$$

ב. המכשיר המתואר הוא דינמו, שממיר אנרגיה קינטית לאנרגיה חשמלית.

מבחן 1

1. ניסוי מיליקן – ניסוי טיפות השמן – הוא ניסוי המאפשר לחשב את מטען האלקטרון. הפיזיקאי האמריקאי רוברט מיליקן (1953–1868) ערך את הניסוי בשנת 1909. מערכת הניסוי התבססה על טיפות שמן טעונות הנמצאות בין שני לוחות שהמרחק ביניהם הוא d, והם מחוברים למקור מתח V_{AB}. כשמנתקים את מקור המתח, הטיפות נעות למטה במהירות קבועה בהשפעתם של כוח הכובד והחיכוך עם האוויר, ובעזרת מהירות זו אפשר לחשב את מסת הטיפה. כשמחברים את מקור המתח ללוחות חלק מהטיפות נעצר וחלקן אף עולה למעלה.



טיפת שמן שמסתה m מרחפת ללא תנועה בין הלוחות.

א. הביעו באמצעות V_{AB}, d, g, m את מטען הטיפה.

ב. האם במהלך טעינת הטיפה התווספו לה אלקטרונים או נגרעו ממנה אלקטרונים? (הניחו שמטען הטיפה לפני הטעינה היה 0)

נתונים:

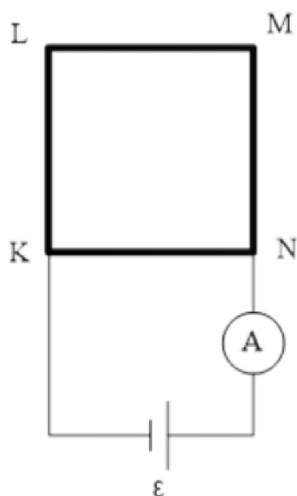
$$m = 6 \cdot 10^{-16} Kg$$
$$V_{AB} = 250V$$
$$d = 0.02m$$

ג. חשבו את היחס שבין מטען הטיפה למטען האלקטרון.

ד. טיפת שמן שמסתה $m = 6 \cdot 10^{-16} Kg$ טעונה במטען שגודלו $|q| = 1.6 \cdot 10^{-19} C$ ומרחפת ללא תנועה בין הלוחות. חשבו את המתח V_{AB}.

ה. מדוע בלתי אפשרי שטיפת שמן שמסתה $m = 6 \cdot 10^{-16} Kg$ תרחף ללא תנועה בין לוחות הלוחות, כאשר המתח הוא $V_{AB} = 300V$?

2. מהנדס קומקומים מתכנן גוף חימום הבנוי ממסגרת ריבועית KLMN. הוא מחבר את המסגרת בשני קודקודים סמוכים KN לאמפרמטר ולמקור מתח, כמתואר בתרשים 1:



תרשים 1

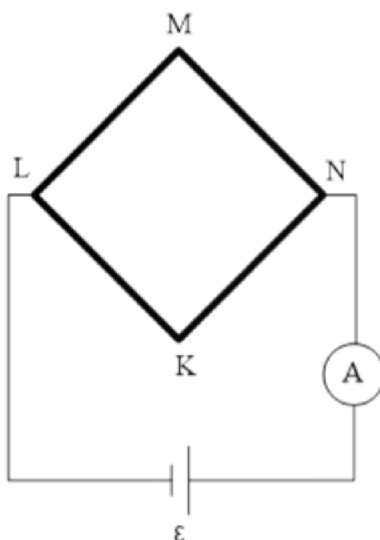
ההתנגדות של כל אחת מצלעות המסגרת היא R. ההתנגדות של שאר רכיבי המעגל אפסית.

א. (1) הביעו באמצעות ε ו–R את הזרם שמורה האמפרמטר.

(2) הביעו באמצעות ε ו–R את ההספק המתפתח בגוף החימום.

ב. הביעו באמצעות ε את הפרש הפוטנציאלים בין הקודקודים L ו–M.

המהנדס מחבר את המסגרת למעגל בשני קודקודים נגדיים L ו־N, כמתואר בתרשים 2.



תרשים 2

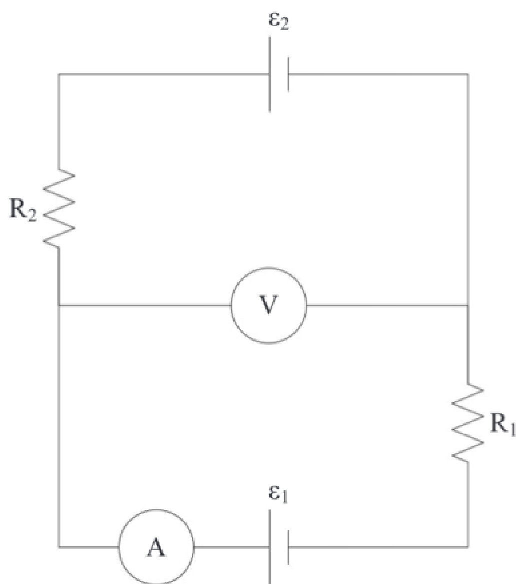
ג. (1) הביעו באמצעות ε ו־R את הזרם שמורה האמפרמטר בתרשים 2.

(2) הביעו באמצעות ε ו־R את ההספק המתפתח בגוף החימום שבתרשים 2.

ד. מהו הפרש הפוטנציאלים בין הקודקודים K ו־M בתרשים 2?

ה. המהנדס עורך ניסוי שבו הוא מחמם כמות מים זהה באמצעות שני הגופים לעיל. גוף החימום שבתרשים 1 חימם את המים לטמפרטורה הנדרשת במשך שלוש דקות. כמה זמן יימשך חימום המים לאותה הטמפרטורה בעזרת גוף החימום שבתרשים 2? הטמפרטורה ההתחלתית בשני המקרים הייתה שווה, ואיבוד החום לסביבה היה זניח.

3. במעגל החשמלי שלפניכם נתון $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ מקורות המתח, האמפרמטר והוולטמטר אידאליים.

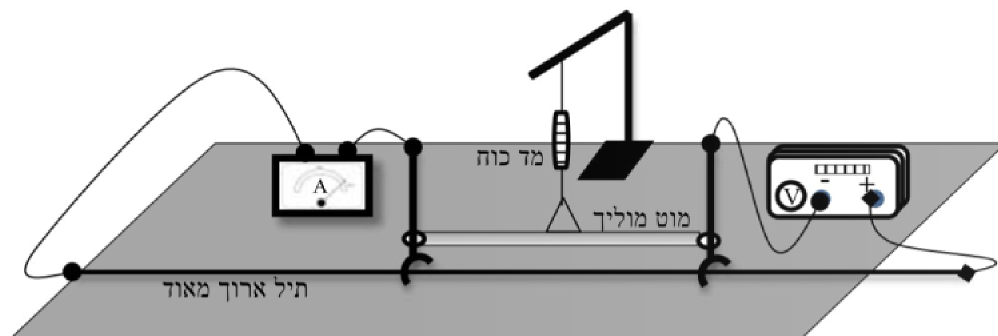


א. הביעו באמצעות הנתונים שבתרשים את הזרם הזורם באמפרמטר. מה כיוון הזרם?

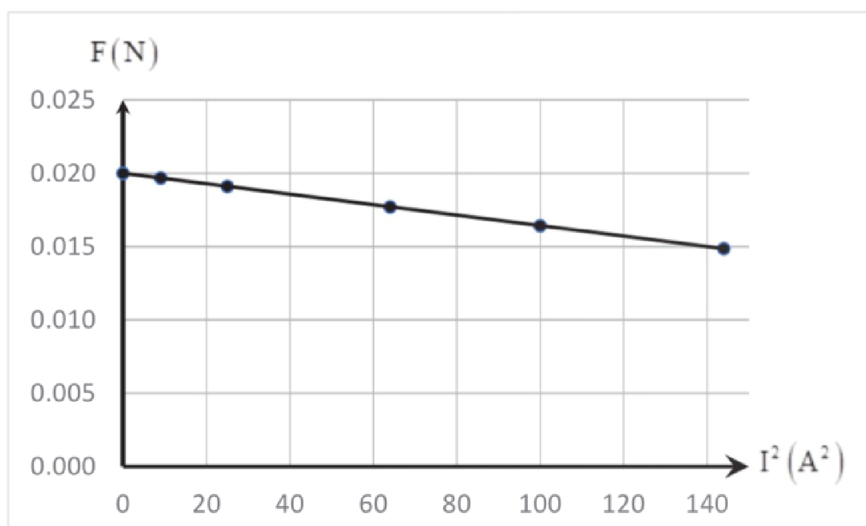
ב. הביעו באמצעות הנתונים שבתרשים את קריאת הוולטמטר, בהנחה שהוא מחובר כך שהקריאה חיובית.

ג. נתון: $R_1 = R_2 = 10\Omega$, הוולטמטר מורה על מתח של 20V וקריאת האמפרמטר היא 0.2A.
חשבו את ε_1 ואת ε_2.

4. תלמידי מגמת הפיזיקה בעמק יזרעאל מבצעים ניסוי למדידת הפרמיאביליות של הריק – μ_0.
מערכת הניסוי כוללת מעגל חשמלי שבו מחוברים בטור מקור מתח ישר בעל מתח ניתן לשינוי, מוט מוליך קל מאוד שמסתו m ואורכו L, תיל ארוך מאוד ואמפרמטר בתחום של 0 עד 20A. המוט תלוי בגובה קבוע h מעל התיל בעזרת מתקן שמחובר למד כוח, כך שהחיכוך הפועל על המוט זניח.



התלמידים משנים מספר פעמים את הזרם במעגל, ורושמים את קריאת האמפרמטר ואת קריאת מד הכוח. באמצעות גיליון אלקטרוני הם משרטטים גרף של קריאת מד הכוח – F כפונקציה של ריבוע הזרם:



א. האם המוט והתיל מושכים זה את זה או דוחים זה את זה?

ב. ללא קשר לתוצאות הניסוי הביעו את קריאת מד הכוח F כפונקציה של ריבוע הזרם I2, באמצעות g, m, μ_0, L, h.

נתון: $h = 0.4cm$, $L = 70cm$, נוסחת הגרף שהתקבלה בגיליון האלקטרוני הייתה $y = 2 \cdot 10^{-2} - 3.57 \cdot 10^{-5} x$ ענו על פי הגרף או על פי נוסחת הגרף על הסעיפים הבאים:

ג. מצאו את מסת המוט.

ד. חשבו את הפרמיאביליות של הריק - μ_0.

ה. האם היה חל שינוי בגרף אילו הפכו התלמידים את כיוון הזרם במעגל? אם כן, תארו את השינוי. אם לא, נמקו.

5. טיפה זעירה טעונה במטען חיובי של $2 \cdot 10^{-5}C$ נעה במהירות של $8\frac{m}{S}$ במרחק של 4mm מתיל ארוך נושא זרם של 12A. בשאלה זו השדה המגנטי של כדור הארץ הוא זניח.

א. הטיפה נעה במישור הדף במקביל לכיוון הזרם. כמתואר בתרשים א.



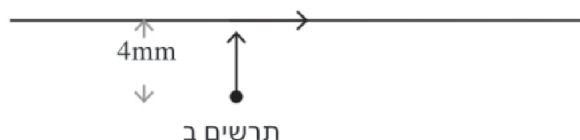
תרשים א

(1) מצאו את גודלו ואת כיוונו של הכוח המגנטי הפועל על הטיפה.

(2) מצאו את גודלו ואת כיוונו של הכוח המגנטי הפועל על התיל.

(3) נתונה מסת הטיפה: $3 \cdot 10^{-14}Kg$. חשבו את רדיוס המעגל של תנועת הטיפה. הניחו שהשדה המגנטי שיוצר התיל, אחיד בסביבת הטיפה.

ב. במקרה השני הטיפה נעה במישור הדף לכיוון התיל, באותה מהירות, כמתואר בתרשים ב. מצאו את גודלו ואת כיוונו של הכוח המגנטי הפועל על הטיפה.



תרשים ב

ג. במקרה השלישי הטיפה נעה באותה מהירות, בניצב למישור הדף לכיוון הקורא. כמתואר בתרשים ג. מצאו את גודלו ואת כיוונו של הכוח המגנטי הפועל על הטיפה.



תרשים ג

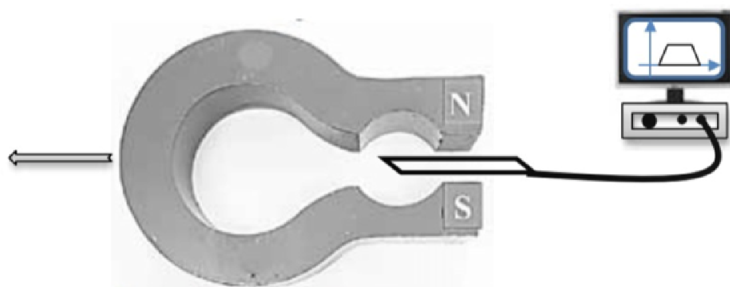
השראה אלקטרומגנטית

6. א. מסגרת מוליכה נמצאת בשדה מגנטי. הוכיחו שבכל פרק זמן Δt מתקיים הקשר הבא:

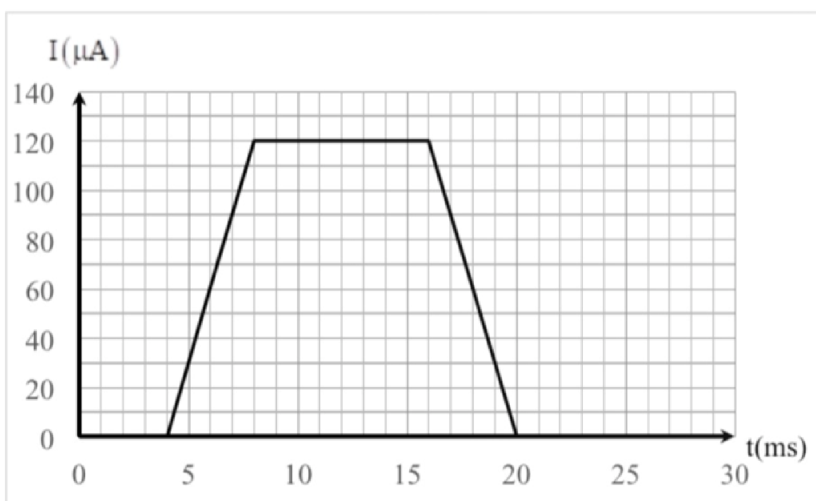
$$\Delta q = -\frac{\Delta \phi_B}{R}$$

כאשר R – התנגדות המסגרת, Δq – כמות המטען שעברה במסגרת בפרק הזמן. ו-$\Delta \phi_B$ – שינוי השטף דרך המסגרת בפרק הזמן. אפשר להניח לשם פשטות שהזרם בפרק הזמן היה קבוע, על אף שהקשר נכון גם כאשר הזרם אינו קבוע בזמן.

מסגרת מלבנית נמצאת בין הקטבים של מגנט חזק. המסגרת מחוברת למד זרם ממוחשב, המציג את הזרם שנוצר במסגרת כפונקציה של הזמן. מושכים במהירות את המגנט, ומרחיקים אותו מהמסגרת. עקב כך נוצר זרם במסגרת.



נתונה התנגדות המסגרת $R = 0.2\Omega$ ונתון הגרף שהתקבל במד הזרם הממוחשב:



ב. כשהמגנט היה במנוחה לא היה זרם במסגרת, אבל במהלך הזזת המגנט נוצר במסגרת זרם. הסבירו את התופעה. איזה חוק פיזיקלי עומד במרכזה?

ג. (1) חשבו על פי הגרף את כמות המטען שעברה במסגרת בפרק הזמן הנראה בגרף.

(2) חשבו את השטף שהיה במסגרת לפני שהזיזו את המגנט.

ד. במקרה אחר במקום להזיז את המגנט שמאלה, המגנט נשאר במקומו ומזיזים את המסגרת ימינה. בחרו בהיגד הנכון מבין ההיגדים הבאים, ונמקו:

(1) כיוון הזרם במסגרת יהיה זהה לכיוונו במקרה הראשון.

(2) כיוון הזרם במסגרת יהיה מנוגד לכיוונו במקרה הראשון.

(3) לא יהיה זרם במסגרת.

פתרונות מבחן 1

1. א. גודלו של הכוח החשמלי הוא $F_E = qE$, כאשר השדה החשמלי הוא $E = \frac{V_{AB}}{d}$,
לכן: $F_E = \frac{qV_{AB}}{d}$. כשהטיפה מרחפת ללא תנועה מתקיים $F_E = mg$. נציב ונביע את מטען הטיפה:

$$mg = \frac{qV_{AB}}{d}$$

$$q = \frac{mgd}{V_{AB}}$$

ב. לפי התרשים הלוח העליון חיובי, לכן כיוון השדה החשמלי בין הלוחות הוא כלפי מטה, כיוון הכוח החשמלי הוא נגד כוח הכובד – למעלה. מכאן שמטען הטיפה שלילי, כי כיוון הכוח החשמלי מנוגד לכיוון השדה. לטיפה התווספו אלקטרונים.

ג. נציב את הנתונים:

$$q = -\frac{mgd}{V_{AB}} = -\frac{6 \cdot 10^{-16} \cdot 10 \cdot 0.02}{250} = -4.8 \cdot 10^{-19}\,c$$

נחשב את היחס:

$$\frac{q}{-e} = \frac{-4.8 \cdot 10^{-19}}{-1.6 \cdot 10^{-19}} = 3$$

ד. באופן דומה נקבל:

$$V_{AB} = \frac{mgd}{q} = \frac{6 \cdot 10^{-16} \cdot 10 \cdot 0.02}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 750V$$

ה. נציב את המתח הנתון:

$$q = -\frac{mgd}{V_{AB}} = -\frac{6 \cdot 10^{-16} \cdot 10 \cdot 0.02}{300} = -4 \cdot 10^{-19}\,C$$

הערך שקיבלנו אינו כפולה שלמה של מטען האלקטרון, לכן אינו קיים בטבע.

$$\frac{q}{-e} = \frac{-4 \cdot 10^{-19}}{-1.6 \cdot 10^{-19}} = 2.5$$

2. א. ראשית נחשב את ההתנגדות השקולה – צורת החיבור מחלקת את גוף החימום לשני נגדים מקבילים – R ו־3R. לכן:

$$\frac{1}{R_t}=\frac{1}{R}+\frac{1}{3R}$$
$$R_t=\frac{3R}{4}$$

(1) נביע את הזרם שמורה האמפרמטר:

$$I=\frac{\varepsilon}{R_t}=\frac{4\varepsilon}{3R}$$

(2) נביע את ההספק:

$$P=I\varepsilon=\frac{4\varepsilon^2}{3R}$$

ב. הפרש הפוטנציאלים בין L ל־M הוא $V_{LM}=\frac{1}{3}\varepsilon$. הסבר סכום המתחים בענף NMLK שווה ל־ε. הענף מורכב משלוש צלעות שהמתח עליהן שווה, שכן התנגדותן שווה, והזרם בהן שווה גם הוא.

ג. ראשית נחשב את ההתנגדות השקולה – צורת החיבור מחלקת את גוף החימום לשני נגדים מקבילים של 2R כל אחד לכן:

$$\frac{1}{R_t}=\frac{1}{2R}+\frac{1}{2R}$$
$$R_t=R$$

(1) נביע את הזרם שמורה האמפרמטר בתרשים 2:

$$I=\frac{\varepsilon}{R_t}=\frac{\varepsilon}{R}$$

(2) נביע את ההספק בתרשים 2:

$$P=I\varepsilon=\frac{\varepsilon^2}{R}$$

ד. הפרש הפוטנציאלים בין M ל־K הוא 0. הסבר הזרם בצלע LM שווה לזרם בצלע LK, לכן $V_{LM}=V_{LK}$. הפוטנציאלים של הקודקודים M ו־K נמצאים בהפרש שווה מהפוטנציאל בקודקוד L, לכן הם שווים זה לזה.

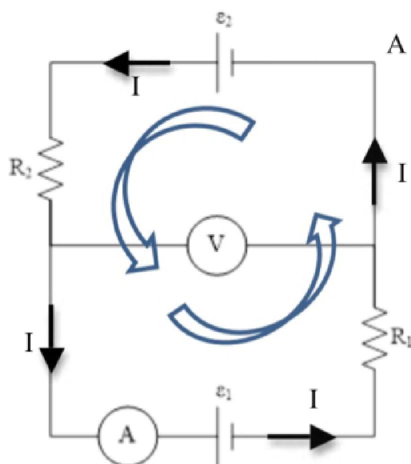
ה. נסמן את ההספקים P_1 ו- P_2 בתרשים 1 ובתרשים 2 בהתאמה.

$$P_1 = \frac{4\varepsilon^2}{3R}$$
$$P_2 = \frac{\varepsilon^2}{R}$$

כמות האנרגיה ΔE הדרושה לחימום המים בשני המקרים שווה. נחשב את משך הזמן לפי הגדרת ההספק $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$:

$$\Delta E_1 = \Delta E_2$$
$$P_1 \cdot \Delta t_1 = P_2 \cdot \Delta t_2$$
$$\frac{4\varepsilon^2}{3R} \cdot \Delta t_1 = \frac{\varepsilon^2}{R} \cdot \Delta t_2$$
$$\frac{4}{3} \cdot 180 = \Delta t_2$$
$$\Delta t_2 = 240\text{s}$$

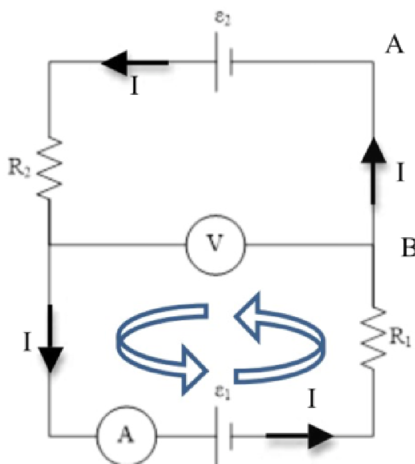
3. א. בוולטמטר אידאלי לא זורם זרם, לכן הזרם קיים רק במסלול הטורי. מכיוון ש- $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, כיוון הזרם נקבע לפי ε_2, לכן כיוון הזרם באמפרמטר הוא משמאל לימין כמתואר בתרשים (אל דאגה. אם טעינו בכיוון הזרם, נקבל ערך שלילי בעבורו בהמשך, ונוכל לתקן):



לפי החוק השני של קירכהוף סכום המתחים לאורך מסלול סגור הוא 0. "נלך" במסלול הסגור מ-A ל-A נגד כיוון השעון, ונקבל את הזרם:

$$\varepsilon_2 - IR_2 - \varepsilon_1 - IR_1 = 0$$
$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = IR_1 + IR_2$$
$$I = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{R_1 + R_2}$$

ב. "נלך" במסלול הסגור מ-B ל-B בלולאה התחתונה נגד כיוון השעון, ונמצא את קריאת הוולטמטר V:



$$V - \varepsilon_1 - IR_1 = 0$$
$$V = \varepsilon_1 + IR_1 = \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{R_1 + R_2} R_1$$
$$= \frac{\varepsilon_1 (R_1 + R_2) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) R_1}{R_1 + R_2} = \frac{\varepsilon_1 R_1 + \varepsilon_1 R_2 + \varepsilon_2 R_1 - \varepsilon_1 R_1}{R_1 + R_2}$$
$$V = \frac{\varepsilon_1 R_2 + \varepsilon_2 R_1}{R_1 + R_2}$$

ג. נציב את הנתונים בביטויים שקיבלנו בסעיפים הקודמים:

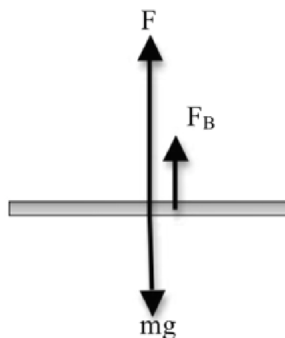
$$\begin{cases} 0.2 = \dfrac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{10+10} \\ 20 = \dfrac{10\varepsilon_1 + 10\varepsilon_2}{10+10} = \dfrac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 4 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \\ 40 = \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_2 = 22V \\ \varepsilon_1 = 18V \end{cases}$$

4. א. החוט והתיל דוחים זה את זה. הסבר: כיוון הזרם בתיל הוא שמאלה, והשדה המגנטי שהוא המוט בסביבת המוט הוא לתוך הדף, כלומר מקביל לשולחן מהקורא והלאה. כיוון הזרם במוט הוא ימינה, לכן לפי כלל יד ימין הכוח המגנטי הפועל על המוט הוא בכיוון מעלה, כלומר המוט נדחה מהתיל.

ב. נשרטט את תרשים הכוחות הפועלים על המוט:



כאשר mg – כוח הכובד, F_B – הכוח המגנטי ו-F – קריאת מד הכוח.

הכוח בין שני תילים מוליכים נתון בנוסחאון:

$$\frac{F_B}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

כאשר d הוא המרחק בין התילים. לכן נציב $\begin{matrix} d = h \\ I_1 = I_2 = I \end{matrix}$ ונקבל:

$$F_B = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi h} L$$
$$F_B = \frac{\mu_0 L}{2\pi h} I^2$$

המוט נמצא במנוחה לכן:

$$F + F_B = mg$$
$$F = mg - F_B = mg - \frac{\mu_0 L}{2\pi h} I^2$$
$$F = mg - \frac{\mu_0 L}{2\pi h} I^2$$

הבענו את קריאת מד הכוח וקיבלנו נוסחת יש מהצורה $y = ax + b$ כאשר $a = -\frac{\mu_0 L}{2\pi h}$ ו- $b = mg$.

ג. נמצא את המסה לפי נקודת החיתוך עם הציר האנכי b:

$$b = mg$$
$$0.02 = 10m$$
$$m = 0.002Kg$$

הערה: שדה הכבידה בעמק יזרעאל נקבע על ידי משרד החינוך כ- $g = 10\frac{m}{s^2}$.

ד. נחשב את הפרמיאביליות של הריק – μ_0 לפי שיפוע הגרף (נשתמש בערך שהתקבל בגיליון האלקטרוני):

$$a = -\frac{\mu_0 L}{2\pi h}$$
$$-3.57 \cdot 10^{-5} = -\frac{\mu_0 \cdot 0.7}{2\pi. \cdot 0.004}$$
$$\mu_0 = 1.28 \cdot 10^{-6} \frac{T \cdot m}{A}$$

הערך שקיבלנו קרוב לערך הנתון בדף הנוסחאות.

ה. הגרף לא היה משתנה. הסבר: כיוון הזרם ישתנה בתיל וגם במוט, לכן עדיין תהיה דחייה הדדית ביניהם.

5. א. (1) השדה המגנטי בסביבת הטיפה הוא:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \ I}{2\pi r} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I}{r} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 12}{0.004} = 6 \cdot 10^{-4} T$$

כיוון השדה הוא לתוך הדף, לפי כלל הבורג.

הכוח הפועל על הטיפה הוא כוח לורנץ:

$$F = qvB = qvB = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 8 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 9.6 \cdot 10^{-8} N$$

כיוון הכוח אל התיל, למעלה, לפי כלל יד ימין.

(2) לפי החוק השלישי של ניוטון, הכוח שהטיפה הפעילה על התיל שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח שמצאנו בסעיף הקודם. לכן גודל הכוח הפועל על התיל הוא: $9.6 \cdot 10^{-8} N$ וכיוונו למטה.

(3) נחשב את הרדיוס:

$$F = ma$$

$$q\not{v}B = m\frac{v^{\not{2}}}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{3 \cdot 10^{-14} \cdot 8}{2 \cdot 10^{-5} \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^{-5} m = 0.02mm$$

ב. השדה לתוך הדף, כיוון המהירות למעלה, לכן לפי כלל יד ימין, כיוון הכוח הוא שמאלה. גודל הכוח לא השתנה, והוא: $9.6 \cdot 10^{-8} N$.

ג. כיוון המהירות במקרה זה מנוגד לכיוון השדה, כלומר רכיב השדה המגנטי הניצב למהירות מתאפס, לכן לא פועל כוח על הטיפה.

6. א. הכא"מ המושרה שנוצר במסגרת נתון בביטוי:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

הזרם במסגרת הוא:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\varepsilon}{R}$$

נציב ונקבל את הביטוי המבוקש:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = -\frac{1}{R}\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\Delta q = -\frac{\Delta\phi}{R}$$

ב. התופעה היא ההשראה האלקטרומגנטית – השינוי בשטף דרך המסגרת יוצר כא"מ מושרה. זהו חוק פאראדיי. כשהמגנט היה במנוחה לא היה שינוי בשטף, לכן לא נוצר כא"מ מושרה ולא זרם זרם במסגרת. במהלך תנועת המגנט נוצר שינוי בשטף, שבעקבותיו נוצרו כא"מ מושרה וזרם במסגרת.

ג. (1) כמות המטען מיוצגת על ידי השטח הכלוא בין הגרף לציר האופקי:

$$\Delta q = \frac{(16+8)\cdot 10^{-3}}{2}\cdot 120\cdot 10^{-6} = 1.44\cdot 10^{-6}\,C$$

(2) השטף לפני הזזת המגנט היה ϕ, והשטף לאחר שהמגנט התרחק היה 0. נציב בביטוי שהוכחנו:

$$\Delta q = -\frac{\Delta\phi}{R}$$

$$\Delta q = -\frac{0-\phi}{R} = \frac{\phi}{R}$$

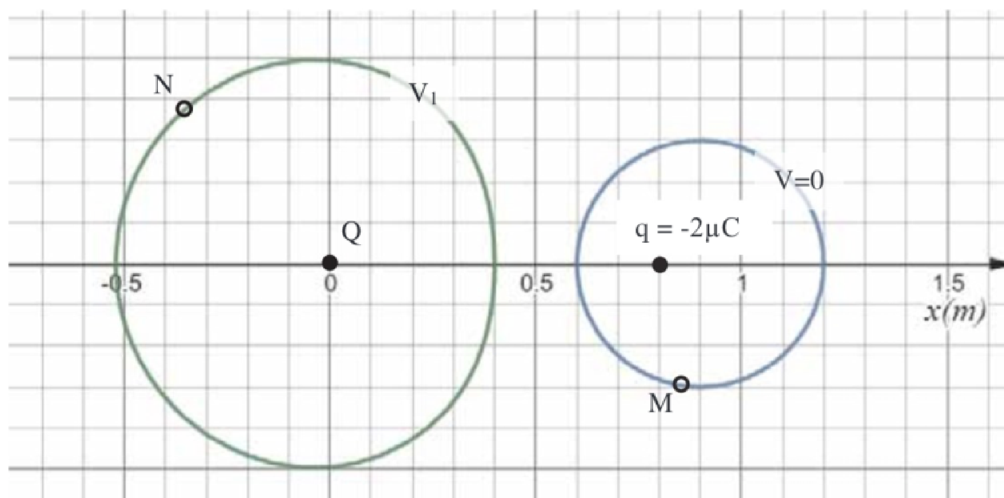
$$\phi = R\cdot\Delta q = 0.2\cdot 1.44\cdot 10^{-6} = 2.88\cdot 10^{-7}\,Wb$$

ד. ההיגד הנכון הוא (1). כיוון הזרם במסגרת יהיה זהה לכיוונו במקרה הראשון. הסבר: בשני המקרים השינוי בשטף זהה – השטף שהיה בהתחלה התאפס, לכן נוצר כא"מ מושרה במגמה זהה בשני המקרים.

מבחן 2

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. שני מטענים קבועים במקומם על ציר ה-x, מטען Q בראשית הציר ומטען $q=-2\mu C$ בנקודה $x=0.8m$. בתרשים שלפניכם משורטטים גם חתכים של שני משטחים שווי פוטנציאל, המשטח $V=0$ והמשטח V_1.



א. חשבו את המטען Q.

ב. חשבו את הפוטנציאל V_1.

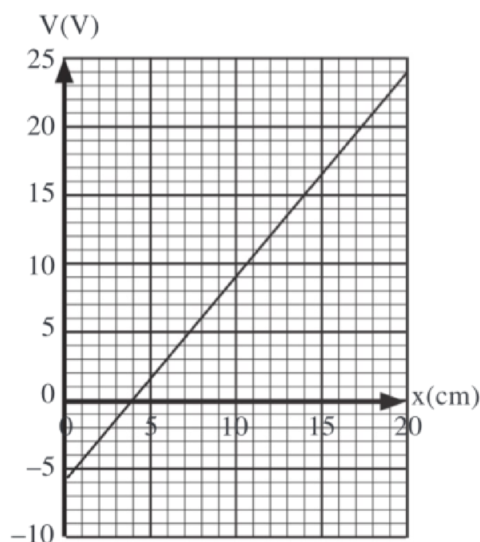
ג. חשבו את גודלו הממוצע של השדה החשמלי בתחום $0.4m \le x \le 0.6m$.

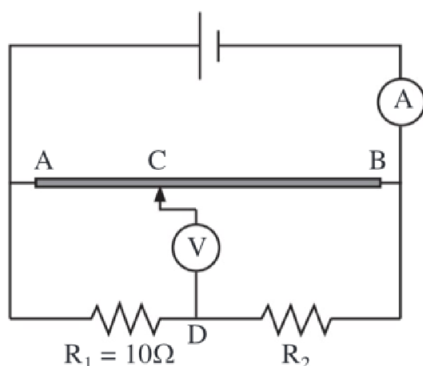
ד. נקודה M נמצאת על המשטח $V=0$, ונקודה N נמצאת על המשטח V_1.

(1) כמה עבודה דרושה כדי להעביר פרוטון מהאינסוף לנקודה M?

(2) כמה עבודה דרושה כדי להעביר פרוטון מנקודה M לנקודה N?

3. במעגל שלפניכם AB הוא נגד משתנה, שאורכו 20 סנטימטרים, עם מגע נייד C. מקור המתח ומכשירי המדידה אידאליים, וקריאת האמפרמטר היא 0.75 אמפר. הגרף שלפניכם מתאר את קריאת הוולטמטר כפונקציה של x – אורך הקטע AC.





א. הסבירו מדוע קריאת האמפרמטר לא משתנה עם הזזת המגע הנייד.

ב. האם הוולטמטר מראה את $V_C - V_D$ או את $V_D - V_C$?

ג. מצאו את כא"מ מקור המתח.

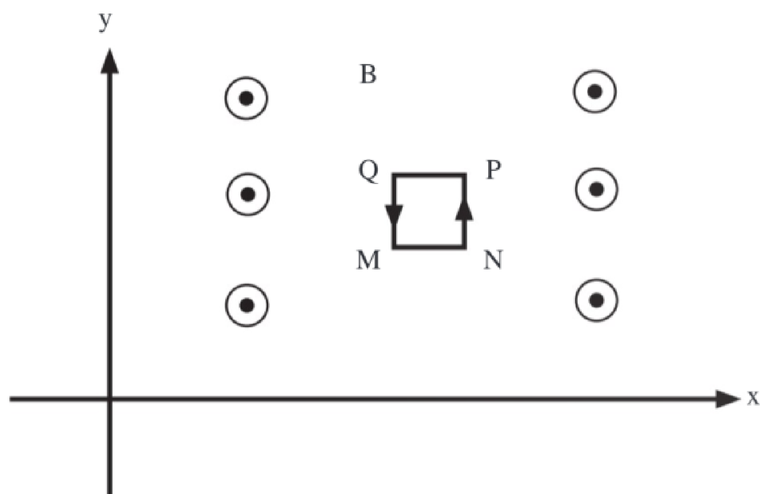
ד. מצאו את התנגדות R_2.

ה. מצאו את התנגדות הנגד המשתנה AB.

4. מסגרת ריבועית MNPQ שצלעה a נושאת זרם I, ונמצאת במישור XY. כיוון השדה המגנטי במישור הוא מתוך הדף, וגודלו משתנה עם שיעור ה–x לפי הנוסחה הבאה:

$$B(x) = B_0 - Cx$$

כאשר B_0 ו–C קבועים חיוביים, גודלו של השדה המגנטי הולך ויורד עם ציר x, אך לא מתאפס בתחום הרלוונטי. הכא"מ המושרה הנוצר במסגרת זניח.



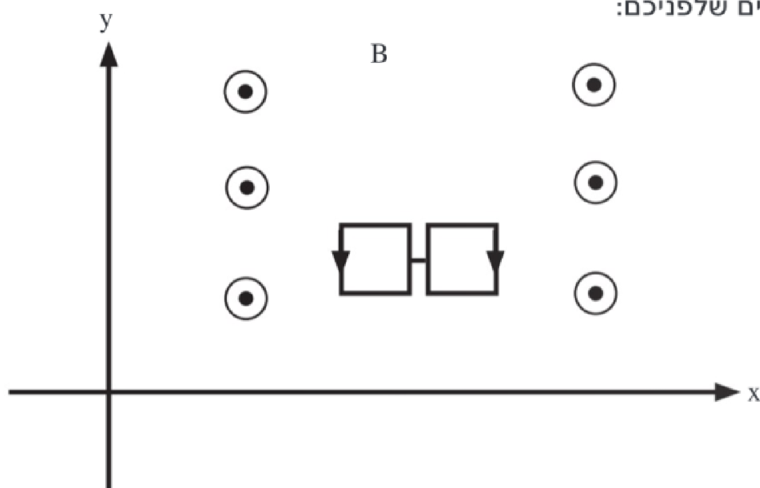
א. מהו סכום הכוחות שמפעיל השדה המגנטי על הצלעות MN ו־PQ? נמקו.

ב. מה כיוון הכוח השקול שמפעיל השדה המגנטי על המסגרת?

ג. הראו שגודלו של הכוח השקול שמפעיל השדה המגנטי על המסגרת, פרופורציוני לשטח המסגרת.

ד. המסגרת חופשית לנוע במישור. תארו את האופי של התנועה (שוות מהירות, שוות תאוצה או בעלת תאוצה משתנה).

ה. מחברים למסגרת הנתונה בחוט מבדד מסגרת דומה. הזרמים שווים וכיווניהם נתונים בתרשים שלפניכם:



שתי המסגרות נמצאות במנוחה. האם הן יתחילו לנוע?

5. רוח השמש היא שטף של חלקיקים הנפלט מפני השמש. פרוטון שמקורו ברוח השמש נע במהירות של $v = 4 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$ במסלול מעגלי מחוץ לאטמוספרה של כדור הארץ, בהשפעת השדה המגנטי של כדור הארץ. הניחו שהשדה המגנטי בסביבת המסלול אחיד בקירוב, וגודלו $B_E = 5 \cdot 10^{-6} T$.

א. (1) חשבו את רדיוס המסלול.

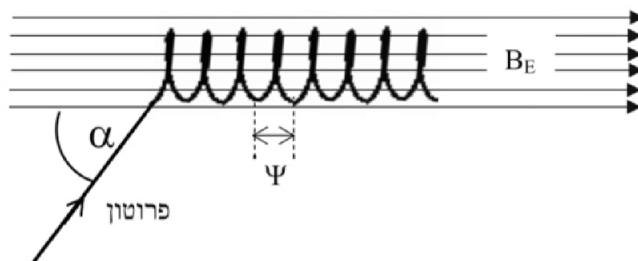
(2) חשבו את זמן המחזור של תנועת הפרוטון.

ב. במקרה שמהירות הפרוטון הייתה גדולה יותר.

(1) האם היה שינוי ברדיוס המסלול? אם כן, האם היה הרדיוס גדול יותר או קטן יותר? נמקו.

(2) האם היה שינוי בזמן המחזור? אם כן, האם היה זמן המחזור גדול יותר או קטן יותר? נמקו.

ג. פרוטון אחר נכנס לאותה הסביבה בזווית α לשדה המגנטי, כך שרכיב מהירותו הניצב לשדה המגנטי הוא $v_{\perp} = 4 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$, ורכיב מהירותו המקביל לשדה המגנטי הוא $v_P = 2 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$.
הפרוטון נע בתנועה בורגית עם פסיעה Ψ. ראו תרשים 1:

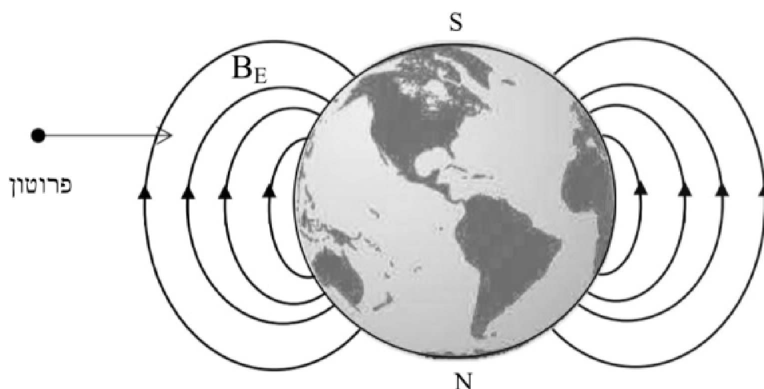


תרשים 1

(1) מהו רדיוס המסלול הבורגי?

(2) חשבו את גודל הפסיעה Ψ.

ד. בתרשים 2 מתואר פרוטון שמקורו ברוח השמש, הנכנס לשדה המגנטי של כדור הארץ בכיוון שאינו אנכי לקווי השדה.



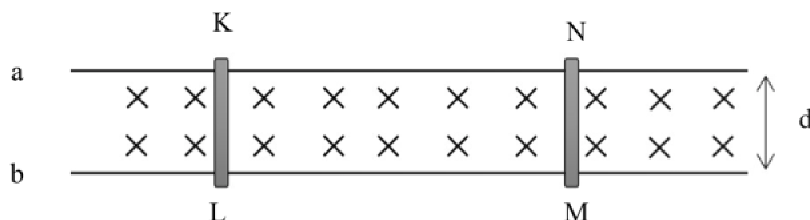
תרשים 2

(1) הקוטב **המגנטי** הצפוני N של כדור הארץ נמצא סמוך לקוטב **הגאוגרפי** הדרומי, הקוטב **המגנטי** הדרומי S סמוך לקוטב הגאוגרפי הצפוני. הסבירו מדוע הקטבים המגנטיים מנוגדים לקטבים הגאוגרפיים.

(2) על פי הסעיפים הקודמים, הסבירו מדוע פרוטונים שחודרים לשדה המגנטי של כדור הארץ מוסטים ממסלולם לכיוון הקטבים (פרוטונים אלה, אלקטרונים וכן וחלקיקים אחרים פוגעים באטמוספרה, ויוצרים את התופעה המוכרת בשם "הזוהר הצפוני" אך היא מתרחשת גם בקוטב הדרומי).

השראה אלקטרומגנטית

6. שני מוטות, KL ו-MN, בעלי מסה m והתנגדות R, נעים על גבי שני פסים מקבילים ומוליכים a ו-b, שהתנגדותם זניחה. הפסים מונחים במישור אופקי, והמרחק ביניהם הוא d. ברחבי המישור האופקי שורר שדה מגנטי B שכיוונו לתוך הדף. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מהו הזרם במוט KL כאשר שני המוטות נעים על הפסים ימינה במהירות v? נמקו.

ב. הביעו באמצעות הנתונים או חלקם את הזרם במוט KL, כאשר המוט MN נע על הפסים ימינה במהירות v, והמוט KL נע על הפסים שמאלה במהירות v. מה כיוון הזרם במוט KL, מ-K ל-L או מ-L ל-K?

ג. החיכוך בין המוט KL לפסים זניח, והמוט ניצב על הפסים ללא תנועה. מניעים את המוט MN על הפסים ימינה במהירות קבועה v. בעקבות התנועה של המוט MN, מתחיל גם המוט KL לנוע.

(1) הסבירו את התופעה.

(2) מה כיוון התנועה של המוט KL?

(3) הביעו את גודלה של תאוצת המוט KL בתחילת התנועה.

(4) *(רמת קושי גבוהה) תארו את תנועת המוט KL בהנחה שהפסים ארוכים מאוד.

פתרונות מבחן 2

1. א. לפי התרשים, הפוטנציאל בנקודה $x = 0.6m$ הוא 0. נסמן ב– r_2 , r_1 את המרחקים משני

המטענים, ונחשב את המטען Q:

$$\frac{kQ}{r_1} + \frac{kq}{r_2} = 0$$

$$Q = -\frac{qr_1}{r_2} = -\frac{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.6}{0.2} = 6 \cdot 10^{-6}C = 6\mu C$$

ב. הפוטנציאל V_1 הוא סכום הפוטנציאלים ששני המטענים יוצרים בנקודה $x = 0.4m$:

$$V_1 = \frac{kQ}{r_1} + \frac{kq}{r_2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{0.4} + \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (-2) \cdot 10^{-6}}{0.4} = 135,000 - 45,000 = 90,000V$$

ג. השדה הוא קצב שינוי הפוטנציאל:

$$\left|\vec{E}\right| = \left|\frac{\Delta V}{\Delta x}\right| = \left|\frac{90,000 - 0}{0.6 - 0.4}\right| = 450,000\frac{V}{m}$$

גודלו הממוצע של השדה החשמלי בתחום הוא 450 אלף וולט למטר.

ד. העבודה הדרושה כדי להעביר מטען q מ– A ל– B היא המטען כפול הפרש הפוטנציאלים בין שתי הנקודות:

$$w_{AB} = qV_B - qV_A = q\left(V_B - V_A\right) = qV_{BA}$$

(1) הפוטנציאל בנקודה M הוא 0, כמו הפוטנציאל באינסוף. לכן אין הפרש פוטנציאלים בין M לאינסוף. והעבודה היא 0.

(2) נחשב את העבודה מ– M ל– N:

מטען הפרוטון הוא $q_P = e = 1.6 \cdot 10^{-19}C$. נציב:

$$w_{MN} = qV_N - qV_M = q_P\left(V_N - V_M\right) = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (90,000 - 0) = 1.44 \cdot 10^{-14}J$$

2. א. (1) חיבור של נורה נוספת במקביל מקטין את ההתנגדות השקולה של המעגל, לכן הזרם בענף הראשי גדל.

(2) המתח על כל נורה שווה למתח ההדקים של המקור. ככל שהזרם גדל, מתח ההדקים קטן. לפי הנוסחה הבאה:

$$V_{AB} = \varepsilon - I_t r$$

לכן עם הוספת נורה נוספת, המתח על כל נורה קטן ועמו ההספק.

ב. נמצא את המתח על הנורה ואת הזרם הזורם בה:

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2 R$$
$$V = \sqrt{PR} = \sqrt{31.25 \cdot 5} = 12.5V$$
$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{31.25}{5}} = 2.5A$$

נחשב את ההתנגדות הפנימית לפי נוסחת מתח ההדקים:

$$V_{AB} = \varepsilon - I_t r$$
$$12.5 = 15 - 2.5r$$
$$r = 1\Omega$$

ג. נמצא את ההתנגדות השקולה של שתי נורות:

$$\frac{1}{R_{||}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{1}{5} + \frac{1}{5}$$
$$R_{||} = 2.5\Omega$$

נחשב את ההתנגדות השקולה של המעגל:

$$R_t = r + R_{||} = 1 + 2.5 = 3.5\Omega$$

נחשב את מתח ההדקים כאשר מחוברות שתי נורות:

$$V = \varepsilon - Ir = \varepsilon - \frac{\varepsilon}{R_t} r = 15 - \frac{15}{3.5} \cdot 1 = 10.7V$$

נציב בנוסחת ההספק:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{10.7^2}{5} = 23.0W$$

ד. נביע את ההתנגדות השקולה של n נורות:

$$\frac{1}{R_{||}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \cdots = \frac{n}{R}$$

$$R_{||} = \frac{R}{n} = \frac{5}{n}$$

נביע את ההתנגדות השקולה של המעגל:

$$R_t = r + R_{||} = 1 + \frac{5}{n}$$

נציב את הזרם המרבי:

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{15}{1 + \frac{5}{n}} = 10$$

$$15 = 10 \cdot \left(1 + \frac{5}{n}\right) = 10 + \frac{50}{n}$$

$$5 = \frac{50}{n}$$

$$n = 10$$

אפשר לחבר עשר נורות לכל היותר.

3. א. הזרם דרך הוולטמטר האידאלי אפסי, לכן להזזת המגע הנייד אין השפעה על הזרמים במעגל.

ב. לפי הגרף, כשהמגע הנייד מתלכד עם A ‏$(x = 0)$, הוולטמטר מראה מתח שלילי: $-6V$.
במצב זה הוולטמטר מראה את המתח שעל הנגד R_1. הזרם בנגד זה זורם משמאל לימין, לכן הפוטנציאל ב-D נמוך מהפוטנציאל ב-A וב-C. הוולטמטר מראה את $V_D - V_C$.

ג. לפי הגרף, הפוטנציאל בנקודה B גבוה ב-30 וולט מהפוטנציאל ב-A, לכן מתח המקור הוא 30 וולט. נראה זאת גם בחישוב:

$$\begin{cases} V_D - V_A = -6V \\ - \\ V_D - V_B = 24V \end{cases}$$
$$V_B - V_A = 30V$$

ד. נחשב את הזרם בנגד R_1:

$$I_1 = I(R_1) = \frac{|V(R_1)|}{R_1} = \frac{6}{10} = 0.6A$$

זהו גם הזרם בנגד R_2, כי הזרם דרך הוולטמטר אפסי, והנגדים מחוברים למעשה בטור.
נמצא את המתח על R_2:

$$V_{AB} = V_{AD} + V_{DB}$$
$$30 = 6 + V_{DB}$$
$$V_{DB} = 24V$$

נציב בחוק אוהם:

$$V_{DB} = I_1 \cdot R_2$$
$$R_2 = \frac{V_{DB}}{I_1} = \frac{24}{0.6} = 40\Omega$$

התנגדות הנגד R_2 היא 40 אוהם.

ה. קיבלנו שהמתח על הנגד AB הוא $V_{AB}=30V$. נחשב את הזרם דרכו לפי חוק הצומת:

$$I_t = I_{AB} + I_1$$
$$0.75 = I_{AB} + 0.6$$
$$I_{AB} = 0.15A$$

נציב בחוק אוהם:

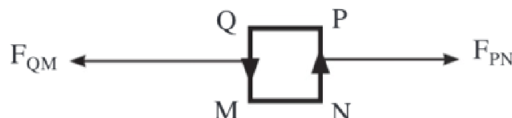
$$V_{AB} = I_t \cdot R_{AB}$$
$$R_{AB} = \frac{V_{AB}}{I_t} = \frac{30}{0.15} = 200\Omega$$

התנגדות הנגד המשתנה היא 200 אוהם.

4. א. סכום הכוחות הוא 0, כי לפי כלל יד ימין, הכוחות הפועלים על הצלעות MN ו-PQ מנוגדים

בכיוונם ושווים בגודלם. אמנם גודל הכוח משתנה לאורך הצלע, אבל הכוח הפועל על כל קטע זרם של הצלע PQ, שווה בגודלו לכוח הפועל על קטע הזרם שמולו, כך שהכוחות מבטלים זה את זה.

ב. לפי כלל יד ימין, כיוון הכוח הפועל על הצלע NP הוא ימינה, וכיוון הכוח הפועל על הצלע QM הוא שמאלה. השדה המגנטי חלש יותר בסביבת הצלע NP, לכן הכוח השקול הוא שמאלה. ראו בתרשים שלפניכם:



ג. נביע את הכוח השקול:

$$\Sigma F = F_{QM} - F_{PN}$$
$$\Sigma F = IB_{QM}a - IB_{PN}a = Ia\left(B_{QM} - B_{PN}\right)$$
$$= Ia\left[\left(B_0 - Cx_{QM}\right) - \left(B_0 - Cx_{PN}\right)\right] = IaC\cdot\left(x_{PN} - x_{QM}\right) = IaC\cdot a$$
$$\Sigma F = ICa^2$$

הראינו שהכוח השקול פרופורציוני ל- a^2 כלומר לשטח המסגרת.

ד. לפי הביטוי שקיבלנו, הכוח השקול קבוע לאורך ציר x. לכן המסגרת תנוע בתאוצה קבועה.

ה. הזרמים בשתי המסגרות מנוגדים, לכן שני הכוחות השקולים פועלים בכיוונים מנוגדים, ומבטלים זה את זה. המסגרות יישארו במקומן.



5. א. (1) נביע את הרדיוס בעזרת החוק השני של ניוטון (נזכור שמטען הפרוטון הוא $q_p = +e$):

$$\Sigma F = ma$$
$$evB = m_p\frac{v^2}{R}$$
$$R = \frac{m_p v}{eB}$$

מסת הפרוטון ומטענו מופיעים בנוסחאון. נציב את הנתונים ונמצא את הרדיוס:

$$R = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot4\cdot10^{5}}{1.6\cdot10^{-19}\cdot5\cdot10^{-6}} = 835\text{m}$$

(2) נמצא את זמן המחזור:

$$v = \omega R = \frac{2\pi}{T}\cdot\frac{mv}{eB}$$
$$T = \frac{2\pi m_p}{eB} = \frac{2\pi\cdot1.67\cdot10^{-27}}{1.6\cdot10^{-19}\cdot5\cdot10^{-6}} = 0.0131\text{s}$$

ב. (1) הרדיוס היה גדול יותר. הסבר: ככל שהמהירות גדולה יותר, כך הרדיוס גדול יותר לפי הביטוי שקיבלנו לרדיוס – $R = \frac{m_p v}{eB}$.

(2) זמן המחזור לא ישתנה כי הוא אינו תלוי במהירות או ברדיוס, לפי הביטוי שקיבלנו לזמן המחזור – $T = \frac{2\pi m_p}{eB}$.

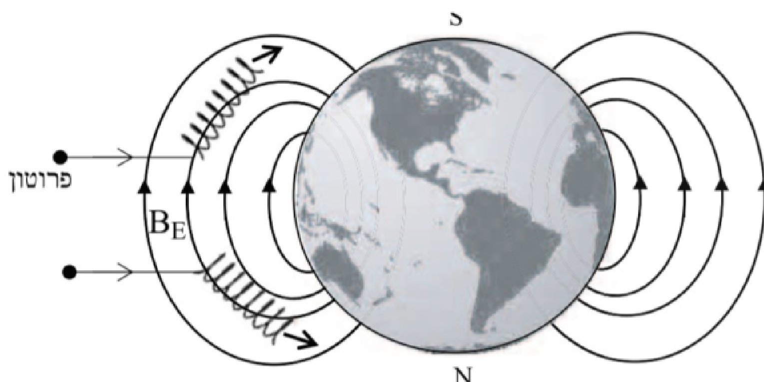
ג. (1) רדיוס המסלול הבורגי הוא 835m. הסבר: רדיוס המסלול אינו מושפע מרכיב המהירות המקביל לשדה המגנטי. אלא מרכיב המהירות הניצב לשדה המגנטי שלא חל בו שינוי.

(2) התנועה במקביל לשדה המגנטי היא במהירות קבועה, לכן גודל הפסיעה שווה לזמן המחזור כפול רכיב המהירות המקביל לשדה המגנטי:

$$\Psi = v_p \cdot T = 0.0131 \cdot 2 \cdot 10^5 = 2,620m$$

ד. (1) הכיוון של קווי השדה המגנטי הוא הכיוון שאליו פונה הקוטב הצפוני של מחט מגנטית (מצפן). אולם הקוטב הצפוני של המחט המגנטית נמשך אל הקוטב המגנטי הדרומי של כדור הארץ, כי קטבים מנוגדים נמשכים זה לזה, לכן הקוטב המגנטי הדרומי של כדור הארץ חייב להימצא בקוטב הגאוגרפי הצפוני (או סמוך לו).

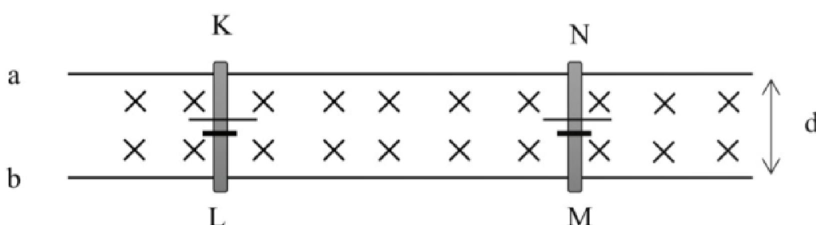
(2) בתרשים 1 אפשר לראות כיצד הפרוטון "נלכד" על ידי קווי השדה המגנטי, ומאולץ להתקדם לאורכם בתנועה בורגית. בתרשים שלפניכם מתואר כיצד הפרוטונים מתקדמים במקביל לקווי השדה לכיוון אחד הקטבים.



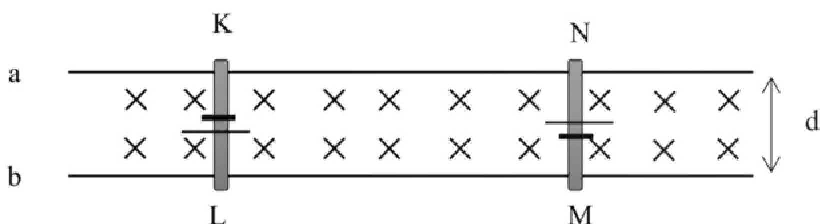
מסלול הפרוטון מוסט צפונה או דרומה

6. א. כאשר שני המוטות נעים על הפסים ימינה במהירות v, הזרם יהיה 0.

- הסבר: המרחק בין המוטות נשאר קבוע, לכן אין שינוי בשטף המגנטי דרך המלבן KLMN. אם אין שינוי בשטף המגנטי, אין כא"מ מושרה, ועל כן אין זרם.
- הסבר נוסף: אפשר להתייחס אל המוטות כאל מקורות מתח, מכיוון ששניהם נעים ימינה, כיווניהם במעגל מנוגדים והכא"מ הכולל הוא 0. ראו בתרשים שלפניכם:



ב. גם כאן אפשר להתייחס אל המוטות כאל מקורות מתח. כאשר המוט MN נע על הפסים ימינה במהירות v, והמוט KL נע על הפסים שמאלה במהירות v, לפי כלל יד ימין, כיווני הכא"מ במעגל הם באותה המגמה. ראו בתרשים שלפניכם:



נביע את הכא"מ הכולל:

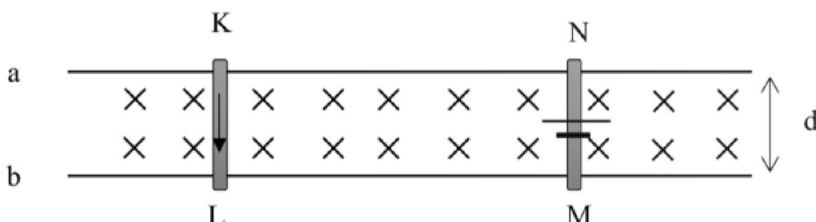
$$\varepsilon_{KL} = \varepsilon_{MN} = vBd$$
$$\Sigma\varepsilon = \varepsilon_{KL} + \varepsilon_{MN} = 2vBd$$

התנגדות הכוללת של המלבן KLMN היא 2R.

נביע את הזרם לפי חוק אוהם:

$$I = \frac{\Sigma\varepsilon}{R_t} = \frac{2vBd}{2R} = \frac{vBd}{R}$$

ג. (1) הכא"מ המושרה שנוצר בעקבות התנועה של המוט MN יוצר זרם מושרה במלבן KLMN ובמוט KL. המוט נושא הזרם KL נמצא בשדה מגנטי, לכן פועל עליו כוח מגנטי שגורם לו להאיץ.



(2) כיוון התנועה של המוט KL הוא ימינה.

- הסבר: על תיל נושא זרם הנמצא בשדה מגנטי פועל כוח: כיוון הזרם הוא מ-K ל-L, וכיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף. לכן לפי כלל יד ימין, כיוון הכוח הוא ימינה.
- הסבר לפי חוק לנץ: התנועה של המוט MN מגדילה את שטח המלבן KLMN. לכן המוט KL מתחיל לנוע ימינה במגמה להקטין את השטח.

(3) נביע את גודלה של תאוצת המוט KL בתחילת התנועה.

$$\varepsilon_{MN} = vBd$$

$$I = \frac{\varepsilon_{MN}}{R_t} = \frac{vBd}{2R}$$

$$\Sigma F = IdB\sin 90° = \frac{vB^2d^2}{2R}$$

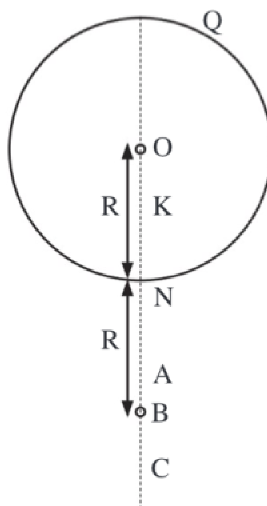
$$a = \frac{\Sigma F}{m} = \frac{vB^2d^2}{2Rm}$$

(4) המוט KL מגביר את מהירותו בהדרגה. עם הגדלת המהירות הכא"מ המושרה הולך וקטן, לכן הזרם קטן. מכאן נובע שהכוח הפועל על המוט הולך וקטן, לכן התאוצה קטנה, כך שמהירות המוט שואפת ל-v. לאחר זמן רב ינועו שני המוטות באותה המהירות (הזרם יתאפס כמו בסעיף א).

מבחן 3

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. נתונה קליפה כדורית שרדיוסה R, הטעונה במטען חשמלי חיובי Q. בנקודה הנמוכה ביותר של הקליפה – N, נמצא נקב קטן שהשפעתו על השדה החשמלי זניחה.



א. הביעו באמצעות Q ו–R את עצמת השדה החשמלי בנקודות הבאות:

(1) נקודה O – מרכז הכדור.

(2) נקודה K – באמצע ON.

(3) נקודה B – במרחק R מ–N.

מציבים בנקודה B טיפת שמן קטנה, שמסתה m, הטעונה במטען חשמלי q, כך שהיא נשארת במנוחה.

ב. הביעו באמצעות הנתונים k , Q, m, g, R את המטען q של הקליפה, וקבעו את סימנו.

ג. קבעו את כיוונו של הכוח השקול הפועל על הטיפה בנקודות הבאות:

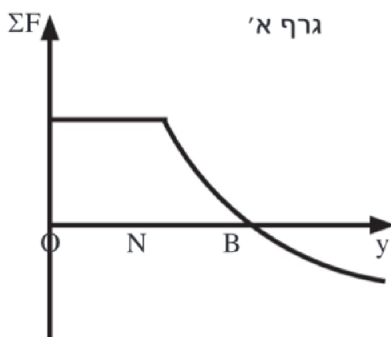
(1) נקודה O – מרכז הכדור.

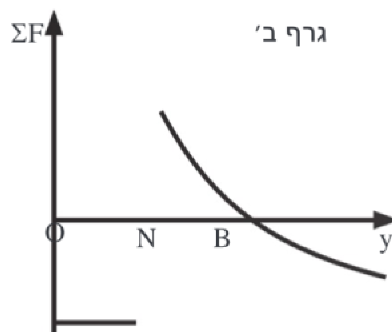
(2) נקודה K – באמצע ON.

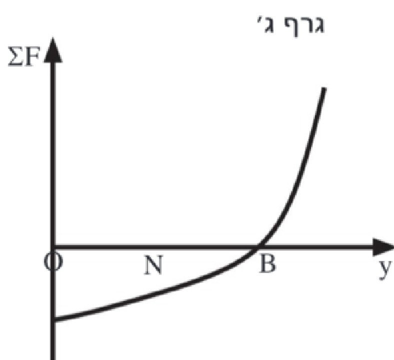
(3) נקודה A – בקטע BN.

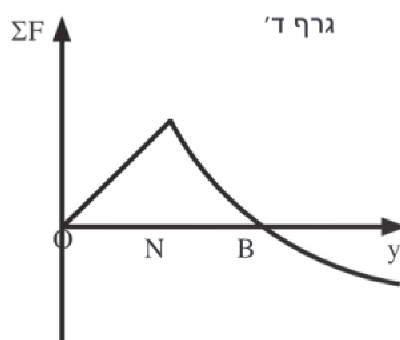
(4) נקודה C – מתחת לנקודה B.

ד. הטיפה נעה מ–O ל–B. איזה גרף מהגרפים הבאים מתאר את הכוח השקול על הטיפה, כפונקציה של המרחק מ–O, כאשר הכיוון החיובי הוא למעלה?







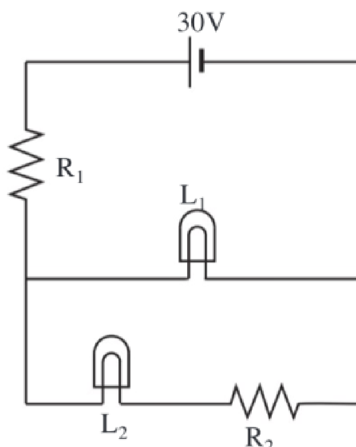


2. תלמידה נלהבת מנסה להפעיל שתי נורות A ו–B. על הנורה A רשום [24V 12W] ועל נורה B רשום [20V 20W].

א. הסבירו מדוע שתי הנורות לא יכולות לפעול כפי שרשום עליהן, כאשר הן מחוברות במקביל זו לזו.

ברשות התלמידה מקור מתח של 30V, שהתנגדותו הפנימית זניחה, וכן מספר נגדים שונים.

היא חיברה את שתי הנורות כפי שמתואר במעגל הבא, והנורות פעלו כפי שרשום עליהן.



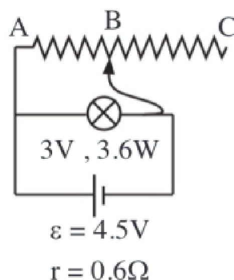
ב. התאימו בין הנורות שבמעגל לנורות A ו–B והסבירו.

ג. חשבו את ערכם של שני הנגדים שהנערה בחרה בהם.

ד. חשבו איזה אחוז מהספק המקור מתבזבז בנגדים.

ה. הנערה רוצה לחבר במקום הנגד R_2, נגד שהתנגדותו גדולה יותר. האם יש חשש שאחת הנורות תישרף? אם כן, הסבירו איזו נורה תישרף. ואם לא, הסבירו מדוע לא.

3. זיו מרכיבה מעגל חשמלי הכולל מקור מתח, נורה ונגד משתנה. ראו בתרשים שלפניכם:



כאשר המגע הנייד מחובר לנקודה B, הנורה מאירה בהתאם לכתוב בה. הניחו שהתנגדות הנורה קבועה.

א. ענו על פי הסדר הנוח לכם:

(1) מהו הזרם במקור המתח?

(2) מהי התנגדות קטע AB של הנגד המשתנה? מהו הזרם הזורם בו?

ב. חשבו את הנצילות של המעגל החשמלי.

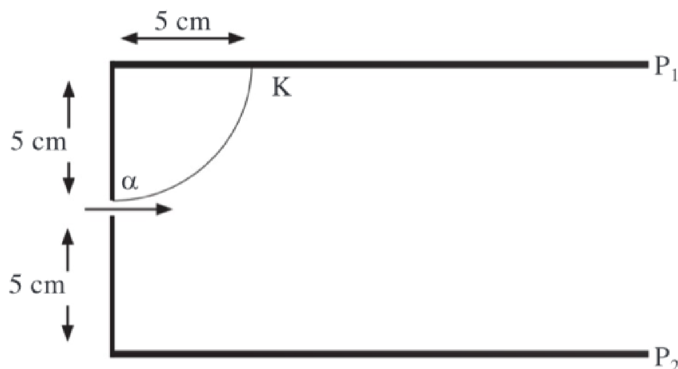
ג. (1) תארו מה צפוי להתרחש בנורה, אם תזיז זיו את המגע הנייד שמאלה מנקודה B.

(2) תארו מה צפוי להתרחש בנורה, אם תזיז זיו את המגע הנייד ימינה מנקודה B.

(3) תארו מה צפוי להתרחש בנורה, אם תזיז זיו את המגע הנייד כך שיתלכד עם נקודה A.

ד. אסף השובב ניגש לשולחן של זיו, וניתק את המגע הנייד. תארו את השפעת הניתוק על הנורה.

4. חלקיקי α משוגרים במהירות של $v = 2\cdot10^4 \frac{m}{s}$ דרך נקב בקיר השמאלי, של תחום הכלוא בין שני לוחות P_1 ו-P_2. נתוני התחום נתונים בתרשים, ובתוכו קיים שדה מגנטי אחיד B. החלקיקים נעים במסלול שצורתו רבע מעגל, ופוגעים בקיר P_1 בנקודה K. נתונים מסת החלקיקים $m_\alpha = 6.64\cdot10^{-27}Kg$ ומטענם $q_\alpha = 3.2\cdot10^{-19}C$.



א. מצאו את גודלו ואת כיוונו של השדה המגנטי בתחום.

ב. מצאו את העבודה שמבצע הכוח המגנטי על חלקיק אחד.

כדי שהחלקיקים ינועו בקו ישר, טוענים את הלוח P_2 במטען חשמלי בצפיפות אחידה היוצר שדה חשמלי קבוע בתחום.

ג. חשבו את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי שנוצר.

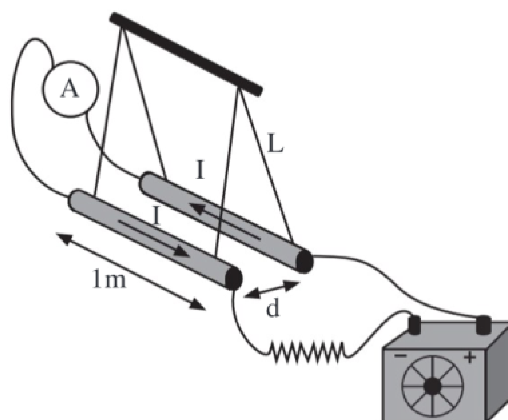
ד. מהו הפרש הפוטנציאלים בין שני הלוחות? איזה לוח נמצא בפוטנציאל גבוה יותר?

מכבים את השדה המגנטי, ומשאירים את השדה החשמלי.

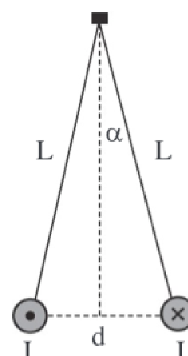
ה. מצאו את מרחקה של נקודת הפגיעה של החלקיקים מהקיר השמאלי.

ו. מצאו את העבודה שמבצע השדה החשמלי על חלקיק אחד.

5. שני מוטות שמסתם m ואורכם $1m$ תלויים על חוטים שאורכם L, כך שהם מקבילים זה לזה. המוטות מחוברים במעגל חשמלי סגור למקור מתח משתנה, לנגד ולאמפרמטר. כשזורם זרם I במוטות, הם מתרחקים זה מזה למרחק d. ראו תרשים א. בתרשים ב המערכת נראית במבט מהצד. הזווית α קטנה מספיק כך שמתקיים $\sin\alpha \approx \tan\alpha$. בשאלה זו יש להתעלם ממסת התילים ומהכוחות שהם מפעילים, ולהתייחס למוטות בלבד.



תרשים א



תרשים ב

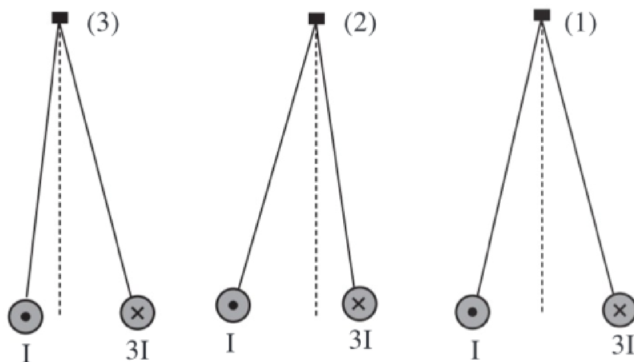
א. מה גורם למוטות להתרחק זה מזה?

ב. הראו שהקשר בין d – המרחק **בין** המוטות לזרם I – הוא:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot L}{mg}} \cdot I$$

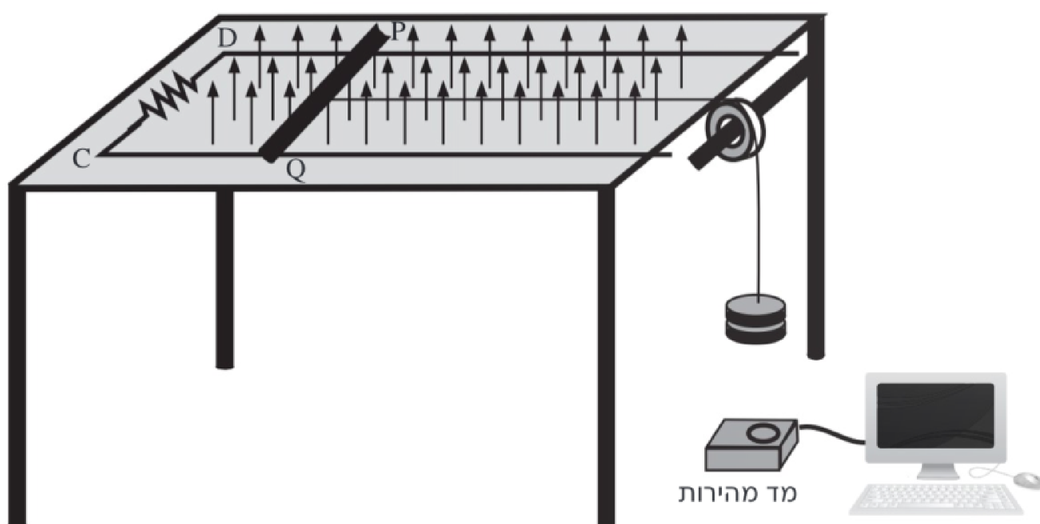
ג. מנסרים את כל אחד מהמוטות לאורך של חצי מטר ותולים אותם באותו האופן, בלי לשנות את הזרם ואת אורך החוטים. האם המרחק d יגדל, יקטן, או יישאר ללא שינוי? נמקו.

ד. אילו היו הזרמים במוטות שונים זה מזה: זרם I במוט השמאלי וזרם של 3I במוט הימני. איזה תרשים מבין התרשימים שלפניכם מתאר נכון את מצבם של שני המוטות?



השראה אלקטרומגנטית

6. מוט מוליך PQ חופשי לנוע ללא חיכוך על שתי מסילות מוליכות מקבילות, שמחוברות זו לזו במסילה CD ונגד R. מסת המוט וההתנגדויות של המוט והמסילות זניחות. המסילות מונחות במרחק d זו מזו על שולחן מגנטי, היוצר שדה מגנטי B, אחיד ורב עוצמה, שכיוונו מעלה. המוט קשור בחוט למשקולת m, וברגע $t = 0$ הוא משוחרר ומתחיל לנוע. מתחת למשקולת מותקן מד מהירות ממוחשב, שמודד את המהירות הרגעית v של המשקולת.



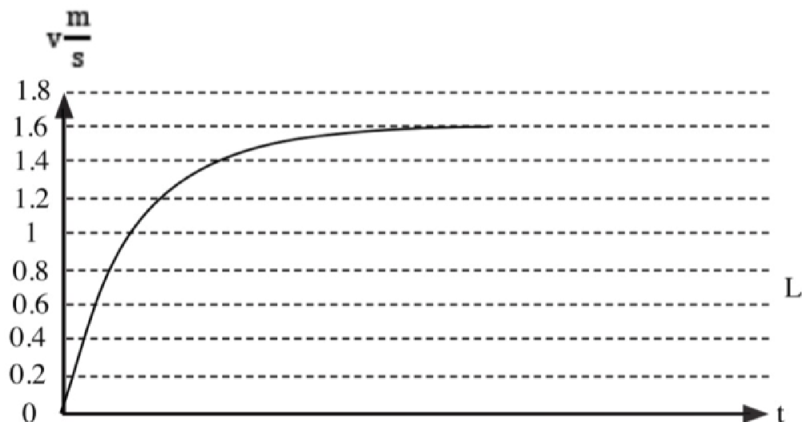
א. במהלך תנועת המוט נוצר זרם בנגד.

(1) מה הסיבה להיווצרות הזרם?

(2) מה כיוון הזרם בנגד, מ-C ל-D או מ-D ל-C?

(3) הביעו את הזרם בנגד באמצעות R, d, B, v.

לפניכם הגרף של מהירות המשקולת כפונקציה של הזמן, שהפיק מד המהירות הממוחשב:



ב. מדוע המהירות מתייצבת על ערך קבוע כעבור זמן מה?

ג. נתון:

$$m = 0.2Kg$$
$$R = 0.9\Omega$$
$$d = 1.5m$$

חשבו את עוצמת השדה המגנטי.

ד. על אף שאין חיכוך במערכת, האנרגיה הקינטית שקיבלה המשקולת קטנה מהאנרגיה הפוטנציאלית הכובדית שהיא הפסידה. הסבירו לאן "נעלמה" האנרגיה.

פתרונות מבחן 3

1. א. (1) + (2) השדה החשמלי בתוך קליפה כדורית שווה 0. לכן השדה החשמלי הוא:

$$E_O = E_K = 0$$

(3) נקודה B נמצאת במרחק של 2R ממרכז הקליפה, לכן השדה החשמלי הוא **כאילו** כל המטען שעל פני הקליפה נמצא במרכזה כמטען נקודתי.

$$E_B = \frac{kQ}{(2R)^2} = \frac{kQ}{4R^2}$$

ב. הכוחות הפועלים על הטיפה הם הכוח החשמלי F_E למעלה, וכוח הכובד mg למטה.
הטיפה מרחפת ללא תנועה, לכן הכוחות שווים בגודלם:

F_E

mg

$$mg = |F_E|$$
$$mg = \frac{kQq}{4R^2}$$
$$|q| = \frac{4mgR^2}{kQ}$$

הסימן של q הוא שלילי, כי הטיפה נמשכת לקליפה.

ג. (1) כיוון הכוח למטה, כי בנקודה O פועל על הטיפה רק כוח הכובד כי השדה החשמלי מתאפס.

(2) כיוון הכוח למטה, כי בנקודה K פועל על הטיפה רק כוח הכובד כי השדה החשמלי מתאפס.

(3) כיוון הכוח למעלה, כי נקודה A קרובה יותר לקליפה מאשר נקודה B, לכן הכוח החשמלי הפועל על הטיפה בנקודה A, גדול יותר מהכוח החשמלי הפועל עליה

בנקודה B:

$$|mg| = |F_E(B)| < |F_E(A)|$$

(4) כיוון הכוח למטה, כי נקודה C רחוקה יותר מהקליפה מאשר נקודה B, לכן הכוח החשמלי הפועל על הטיפה בנקודה C, קטן מהכוח החשמלי הפועל עליה בנקודה B:

$$|mg| = |F_E(B)| > |F_E(C)|$$

ד. לפי הסעיפים הקודמים הגרף הנכון הוא גרף ב׳.

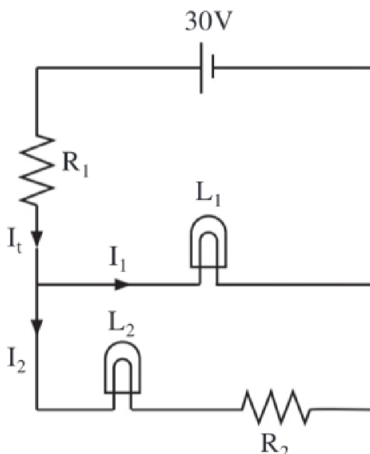
2. א. כאשר הנורות מחוברות במקביל זו לזו, המתח על שתיהן צריך להיות שווה, בניגוד למה שרשום עליהן.

ב. המתח על הנורה L_1 שווה לסכום המתחים על הענף המקביל, כלומר:

$$V(L_1) = V(L_2) + V(R_2)$$

לכן $V(L_1) > V(L_2)$. הנורה L_1 היא נורה A, כי המתח הרשום עליה גדול יותר. הנורה L_2 היא נורה B.

ג. נחשב את הזרם בכל אחת מהנורות ואת הזרם דרך המקור:



$$P = IV$$

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1} = \frac{12}{24} = 0.5A$$

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} = \frac{20}{20} = 1A$$

לפי חוק הצומת:

$$I_t = I_1 + I_2 = 0.5 + 1 = 1.5A$$

חישוב R_1: נחשב את המתח על הנגד לפי חיבור מתחים: סכום המתחים על הנגד R_1 ועל הנורה L_1 שווה לכא"מ המקור, כלומר:

$$V(R_1) + V(L_1) = \varepsilon$$
$$V(R_1) + 24 = 30$$
$$V(R_1) = 6V$$

לפי חוק אוהם:

$$R_1 = \frac{V(R_1)}{I_t} = \frac{6}{1.5} = 4\Omega$$

חישוב R_2: נחזור ונשווה את המתחים על הענפים המקבילים, ונמצא את המתח על הנגד R_2:

$$V(L_1) = V(L_2) + V(R_2)$$
$$24 = 20 + V(R_2)$$
$$V(R_2) = 4V$$

לפי חוק אוהם:

$$R_2 = \frac{V(R_2)}{I_t} = \frac{4}{1} = 4\Omega$$

ד. נחשב את ההספק המבוזבז בנגדים, ונחלק בהספק המקור:

$$\frac{p(R_1) + p(R_2)}{p(\varepsilon)} = \frac{I_t^2 R_1 + I_2^2 R_2}{I_t \varepsilon} = \frac{1.5^2 \cdot 4 + 1^2 \cdot 4}{1.5 \cdot 30} = \frac{13}{45} = 28.9\%$$

ה. אם נגדיל את R_2, יקטן הזרם דרך המקור, לכן יקטן המתח על R_1. אבל

$\varepsilon = V(R_1) + V(L_1)$,

מכאן שהמתח על הנורה L_1 יגדל, והיא עלולה להישרף.

3. א. (1) הנורה מחוברת במקביל למקור המתח, לכן מתח ההדקים של המקור הוא 3V. נציב בנוסחת מתח ההדקים, ונמצא את הזרם במקור המתח:

$$V_{AB} = \varepsilon - I_t r$$
$$3 = 4.5 - I_t \cdot 0.6$$
$$0.6 \cdot I_t = 1.5$$
$$I_t = 2.5A$$

(2) ראשית נמצא את הזרם דרך הנורה. נתון שהנורה מאירה בהתאם לכתוב בה. נציב בנוסחה $P = IV_{AB}$ ונמצא את הזרם:

$$3.6 = I_{\otimes} \cdot 3$$
$$I_{\otimes} = 1.2A$$

נמצא את הזרם בנגד המשתנה על פי חוק הצומת.

$$I_t = I_{\otimes} + I_R$$
$$2.5 = 1.2 + I_R$$
$$I_R = 1.3A$$

הקטע AB בנגד המשתנה מחובר במקביל לנורה, לכן המתח בקטע AB גם הוא 3V.

כעת נציב בחוק אוהם:

$$V_{AB} = I_R R$$
$$3 = 1.3R$$
$$R = 2.31\Omega$$

ב. נחשב את הנצילות:

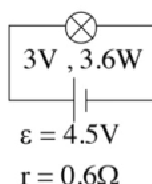
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{IV}{I\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{3}{4.5}$$
$$\eta = \frac{2}{3}$$

ג. (1) אם המגע הנייד יזוז שמאלה, תקטן ההתנגדות השקולה של המעגל ־ הזרם דרך המקור יגדל – ומתח ההדקים יקטן (על פי הנוסחה $V_{AB} = \varepsilon - I_t r$). המתח על הנורה יקטן בהתאם, כי הוא שווה למתח ההדקים, ועל כן תאיר הנורה באור חלש יותר.

(2) באותו האופן, אם המגע הנייד יזוז ימינה, יגדל המתח על הנורה, והיא תאיר בעוצמה חזקה יותר מהכתוב בה, והיא עלולה להישרף.

(3) כאשר המגע הנייד מתלכד עם נקודה A נוצר מצב של קצר על הנורה. המתח עליה יתאפס, והיא תיכבה.

ד. כשהמגע הנייד מנותק נוצר מעגל פשוט של נורה ומקור מתח.



ראשית נחשב את התנגדות הנורה:

$$P = \frac{V^2}{R}$$
$$3.6 = \frac{3^2}{R_{\otimes}}$$
$$R_{\otimes} = 2.5\Omega$$

כעת נחשב את הזרם:

$$I_{\otimes} = \frac{\varepsilon}{R_{\oplus} + r} = \frac{4.5}{2.5 + 0.6} = 1.45A$$

קיבלנו זרם גדול יותר מהזרם שחישבנו בסעיף א. גם ההספק יהיה גדול יותר, ועל כן תאיר הנורה בעוצמה חזקה מהעוצמה הכתובה בה, והיא עלולה להישרף.

4. א. כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף. לפי כיוון תנועת החלקיקים וכלל יד ימין.

נחשב את גודל השדה לפי החוק השני של ניוטון, כאשר נזכור שהכוח המגנטי הפועל על החלקיקים הוא סוג של כוח צנטריפטלי:

$$\Sigma F = ma$$

$$qvB = m\frac{v^2}{R}$$

$$B = \frac{m_\alpha v}{q_\alpha R} = \frac{6.64 \cdot 10^{-27} \cdot 2 \cdot 10^4}{3.2 \cdot 10^{-19} 0.05} = 8.3 \cdot 10^{-3} T$$

ב. העבודה שהכוח המגנטי מבצע היא 0, כי כיוונו הוא תמיד מאונך לכיוון התנועה.

ג. כדי שהחלקיקים ינועו בקו ישר, הכוח השקול הפועל עליהם שווה 0. לכן כיוון הכוח החשמלי הפועל עליהם הוא למטה. מכיוון שמטען החלקיקים חיובי, כיוון השדה הוא עם כיוון הכוח, למטה. נחשב את גודל השדה החשמלי:

$$\Sigma F = 0$$

$$F_E = F_B$$

$$qE = qvB$$

$$E = vB = 2 \cdot 10^4 \cdot 8.3 \cdot 10^{-3} = 166\frac{V}{m}$$

עוצמת השדה החשמלי היא $166\frac{V}{m}$.

ד. נחשב את הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות לפי הנוסחה $E=\frac{V_{AB}}{d}$, המופיעה בנוסחאון (d – המרחק בין שני הלוחות):

$$E=\frac{V_{AB}}{d}$$
$$V_{AB}=dE=0.1\cdot166=16.6V$$

הפרש הפוטנציאלים הוא 16.6 וולט. כיוון השדה החשמלי הוא מהפוטנציאל הגבוה לנמוך, לכן הלוח P_1 נמצא בפוטנציאל גבוה יותר.

ה. נמצא את זמן התנועה לפי ההעתק האנכי:

$$\Delta y=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\cdot\frac{F_E}{m_\alpha}t^2=\frac{1}{2}\cdot\frac{q_\alpha\cdot E}{m_\alpha}t^2$$
$$t=\sqrt{\frac{\Delta y\cdot 2m_\alpha}{q_\alpha\cdot E}}=\sqrt{\frac{0.05\cdot2\cdot6.64\cdot10^{-27}}{3.2\cdot10^{-19}\cdot166}}=3.54\cdot10^{-6}s$$

נמצא את ההעתק האופקי:

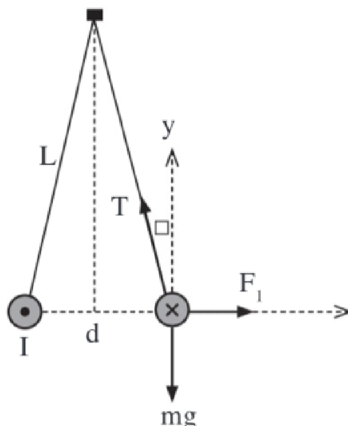
$$x=vt=2\cdot10^4\cdot3.54\cdot10^{-6}=0.0707m=7.07cm$$

ו. עבודת השדה החשמלי היא:

$$w=F_E\cdot\Delta y=q_\alpha E\cdot\Delta y=3.2\cdot10^{-19}\cdot166\cdot0.05=2.66\cdot10^{-18}J$$

5. א. בין שני המוטות קיים כוח דחייה מגנטי. מוט אחד הנושא זרם, משרה בסביבתו שדה מגנטי, והמוט האחר שגם הוא נושא זרם מושפע מהשדה.

ב. נשרטט תרשים של כוחות הפועלים על המוט הימני ומערכת צירים:



$$\begin{cases} T\sin\alpha = F_I \\ T\cos\alpha = mg \end{cases}$$

$$\tan\alpha = \frac{F_I}{mg}$$

נביע את $\tan\alpha$ באמצעות L ו-d, ונציב:

$$\tan\alpha \approx \sin\alpha = \frac{\frac{1}{2}d}{L} = \frac{d}{2L}$$

$$\frac{d}{2L} = \frac{F_I}{mg}$$

הכוח F_I הוא הכוח הפועל בין שני המוטות, הנוסחה של הכוח ליחידת אורך, כלומר ל-1m, נתונה בנוסחאון (נתון שאורך המוטות הוא אכן 1m).

$$\frac{F_I}{1m} = \frac{\mu_0 I \cdot I}{2\pi d}$$

נציב:

$$\frac{d}{2L} = \frac{\mu_0 I \cdot I}{2\pi d \cdot mg}$$

$$\frac{d}{2L} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d \cdot mg} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I^2}{d \cdot mg}$$

$$d^2 = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot L}{mg} \cdot I^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot L}{mg}} \cdot I$$

ג. המרחק יישאר ללא שינוי. הסבר לפי הביטוי שקיבלנו לעיל:

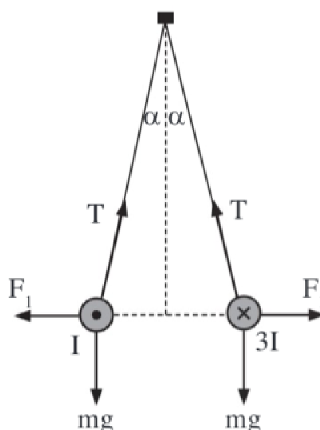
$$\frac{d}{2L} = \frac{F_I}{mg}$$

כאשר יהיה אורך המוטות מחצית מאורכם ההתחלתי, יקטן הכוח פי 2, אבל גם מסת המוט תקטן פי 2, והמרחק d יישאר ללא שינוי.

ד. התרשים שמתאר נכון את מצבם של שני המוטות הוא (1). הסבר: בפתרון סעיף ב קיבלנו את הביטוי:

$$\tan\alpha = \frac{F_I}{mg}$$

על פי החוק השלישי של ניוטון על אף הזרם השונה, גודלו של כוח הדחייה ההדדי ביניהם שווה, מסתם שווה, ועל כן שניהם סוטים מהאנך בזוויות שוות. ראו בתרשים שלפניכם:



6. א. (1) הזרם נוצר במעגל הסגור PQCD עקב כא"מ מושרה. ביתר פירוט נציג שני הסברים:

- במוט מוליך הנע בשדה מגנטי נוצר כא"מ מושרה בין שני קצותיו, כלומר בין P ל-Q.
- השטף במעגל הסגור PQCD הולך וגדל במהלך תנועת המוט. שינוי השטף יוצר כא"מ מושרה במעגל על פי חוק פראדיי.
- הכא"מ המושרה במעגל מזרים בו זרם מושרה.

(2) כיוון הזרם בנגד הוא מ-C ל-D. נסביר זאת על פי חוק לנץ: תנועת המוט מגדילה את שטח המשטח PQCD, לכן השטף המגנטי דרך המשטח גדל עם הזמן. הגדלת השטף גורמת כא"מ מושרה במעגל וזרם מושרה. על פי חוק לנץ, הזרם המושרה במעגל חייב ליצור שדה מגנטי מושרה המתנגד לשינוי בשטף המגנטי ההולך וגדל, כלומר להקטין חזרה את השטף המגנטי, לכן כיוון השדה המגנטי המושרה הוא למטה. על פי כלל הבורג, כיוון הזרם המתאים לכך הוא מ-C ל-D.

(3) נביע את הזרם בנגד:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vL_{\perp}B_{\perp}}{R}$$

התיל מאונך למהירות ואורכו d. השדה המגנטי מאונך לשניהם, לכן:

$$I = \frac{vdB}{R}$$

ב. כתוצאה מזרימת הזרם במוט, השדה המגנטי מפעיל עליו כוח מגנטי, שכיוונו מנוגד לכיוון תנועתו. עם הגדלת המהירות, הכוח המגנטי גדל ושואף אסימפטוטית למשקל המשקולת, לכן על פי החוק השני של ניוטון, התאוצה שואפת ל-0. במצב זה המהירות מתייצבת על ערך קבוע.

ג. נשווה את הכוח המגנטי למשקל המשקולת:

$$mg = I \cdot \ell B \sin \alpha$$
$$mg = IdB$$

נציב את הזרם שקיבלנו:

$$mg = \frac{vdB}{R} \cdot dB$$

$$mg = \frac{vd^2B^2}{R}$$

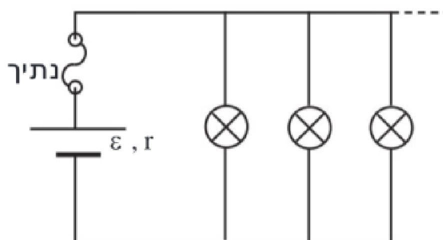
$$B = \sqrt{\frac{mgR}{vd^2}}$$

על פי הגרף, המהירות מתייצבת על ערך של $1.6\frac{m}{s}$. נציב ונקבל את עוצמת השדה המגנטי:

$$B = \sqrt{\frac{0.2 \cdot 10 \cdot 0.9}{1.6 \cdot 1.5^2}} = 0.707T$$

ד. האנרגיה ש"נעלמה" הפכה לחום בנגד. נגד שזורם בו זרם, ממיר אנרגיה חשמלית לחום.

2. נתיך הוא רכיב במעגל חשמלי שתפקידו להפסיק את הזרם, כאשר הוא עולה על ערך המוגדר מראש. כשערך הזרם עובר את הערך המותר, הנתיך "נשרף" או "קופץ", ומנתק את הזרם בענף שבו הוא מחובר. במעגל שלפניכם מחוברות מספר נורות זהות לאותו ספק מתח בעל כא"מ ε והתנגדות פנימית r המוגן על ידי נתיך (התנגדות הנורות קבועה והתנגדות הנתיך זניחה).



א. כאשר מחברים נורה נוספת לספק:

(1) האם הזרם בנתיך גדל, קטן או נשאר ללא שינוי?

(2) האם עוצמת האור של כל נורה גדלה, קטנה או נשארת ללא שינוי?

ההתנגדות של כל אחת מהנורות היא 5 אוהם. והכא"מ של הספק הוא 15 וולט.

ב. ההספק שמתפתח בנורה אחת המחוברת לספק לבדה הוא 31.25 ואט. חשבו את ההתנגדות הפנימית של הספק.

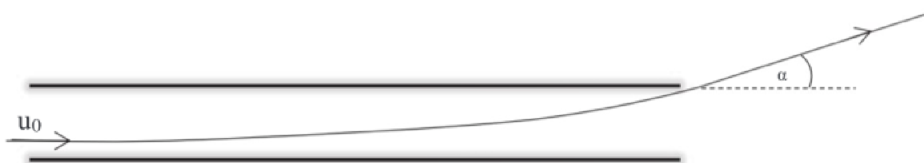
ג. מהו ההספק שמתפתח בכל נורה כאשר מחברים שתי נורות לספק?

ד. כמה נורות לכל היותר אפשר לחבר לספק, בלי לשרוף את הנתיך, אם הזרם המרבי שלו הוא 10 אמפר?

מבחן 4

ענו על שלוש מן השאלות 6–1

1. אלומת אלקטרונים נכנסת בין שני לוחות טעונים. לאחר המעבר בין הלוחות היא סוטה מכיוונה המקורי בזווית α כלפי מעלה. בשאלה זו הזניחו את כוח הכובד. ראו בתרשים שלפניכם:



נתונים:

- u_0 המהירות ההתחלתית של האלקטרונים.
- L אורך הלוחות.
- d המרחק בין שני הלוחות.
- V הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות.
- e גודל מטען האלקטרון.
- m_e מסת האלקטרון.

א. מהי צורת המסלול של אלומת האלקטרונים?

ב. מהו כיוון השדה החשמלי השורר בין הלוחות?

ג. הביעו באמצעות הנתונים או בחלקם את הטנגנס של זווית הסטייה α.

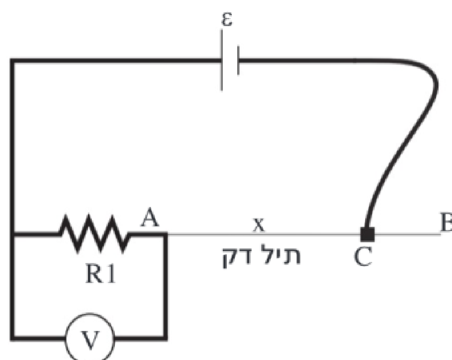
ד. מחליפים את אלומת האלקטרונים באלומת פרוטונים, שמסתם גדולה פי 1,840 ממסת האלקטרונים. האלומה נכנסת במהירות u_0, ונמצא שזווית הסטייה קטנה. לפניכם שתי אפשרויות, שכל אחת מהן לחוד תגדיל את הזווית, כך שגודלה ישתווה לגודלה הקודם:

i. שינוי הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות.

ii. שינוי המהירות ההתחלתית של הפרוטונים.

קבעו לכל אחת מהאפשרויות את השינוי הדרוש (הגדלה או הקטנה ופי כמה).

.2 יוגב מבצע ניסוי למדידת ההתנגדות הסגולית של ברזל ρ. הוא בונה את המעגל החשמלי המתואר בתרשים שלפניכם. AB הוא תיל ברזל דק ששטח החתך שלו הוא A. R_1 הוא נגד קבוע. כא"מ מקור המתח הוא ε, והתנגדותו הפנימית זניחה. הוולטמטר אידאלי.



יוגב הזיז את הגררה C לאורך התיל, רשם את קריאת הוולטמטר V כפונקציה של x, אורך הקטע AC, וקיבל את התוצאות הבאות:

x(m)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$\frac{1}{V}\left(V^{-1}\right)$	0.41	0.45	0.54	0.57	0.65	0.72	0.79	0.84	0.91

א. הביעו בעזרת R_1, ρ, A, x את ההתנגדות השקולה של המעגל.

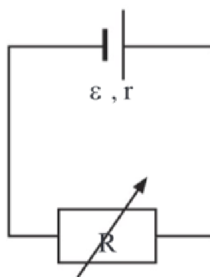
ב. שרטטו גרף של $\frac{1}{V}$ כפונקציה של x.

ג. מצאו בעזרת הגרף את הכא"מ ε.

ד. חשבו את שיפוע הגרף, וציינו את יחידותיו.

ה. נתון לסעיף זה בלבד: $A = 0.16\text{mm}^2$, $R_1 = 0.4$. מצאו לפי שיפוע הגרף את ההתנגדות הסגולית של הברזל.

3. המעגל החשמלי שלפניכם כולל סוללה ונגד משתנה, בעל התנגדות מרבית של 10 אוהם.



א. הביעו את הספק הנגד R כפונקציה של R, r, ε.

הגרף שלפניכם הוא גרף של ההספק של הנגד המשתנה כפונקציה של התנגדותו.



ב. הסבירו את צורת הגרף. מדוע ההספק נמוך כאשר ההתנגדות נמוכה? ומדוע הוא הולך ויורד גם בערכים גבוהים של ההתנגדות?

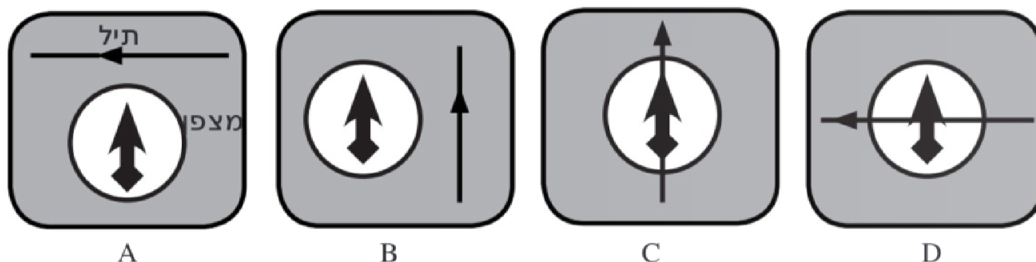
ג. מצאו את הכא״מ של הסוללה ואת התנגדותה הפנימית (הנחיה: מצאו את הזרם ואת מתח ההדקים לשני ערכים שונים של ההתנגדות: 3 אוהם ו–9 אוהם).

ד. מהי הנצילות של הסוללה כאשר **ההספק** הוא מקסימלי?

ה. איזו נקודה בגרף מייצגת מצב שבו **הזרם** הוא מקסימלי? חשבו את הזרם המקסימלי.

4. את הקשר הראשון בין חשמל למגנטיות גילה בשנת 1820 הפיזיקאי והכימאי הדני הנס כריסטיאן ארסטד. יש האומרים שהגילוי היה יד המקרה, אך ארסטד עצמו טוען שהיה מכוון. במהלך הרצאה הניח ארסטד מצפן סמוך לתיל נושא זרם, ולהפתעתו ולהפתעת המאזינים סטתה מחט המצפן מכיוונה. עוד קודם לכן חשדו המדענים בהשפעה שיש לזרם החשמלי על מחט המצפן, אבל כולם טעו בחושבם שהמחט תסטה לכיוון התיל.

א. לפניכם ארבע אפשרויות למצב הדדי בין התיל למצפן. באפשרויות A ו–B המצפן מונח ליד התיל, ובאפשרויות C ו–D הוא מונח מעל התיל. רק באחת מהאפשרויות תסטה מחט המצפן כאשר יזרום זרם בתיל. ציינו באיזו אפשרות מבין הארבע תיווצר הסטייה. הסבירו מדוע היא תיווצר, ומדוע לא תסטה מחט המצפן בכל שלוש האפשרויות האחרות (התרשימים מתארים את מצב המחט כאשר לא זורם זרם בתיל).



בניסוי שנערך במערכת דומה, נמדדה זווית הסטייה של מחט המצפן כפונקציה של מרחק התיל מהמצפן, והתקבלו התוצאות הבאות לזרם של 3A.

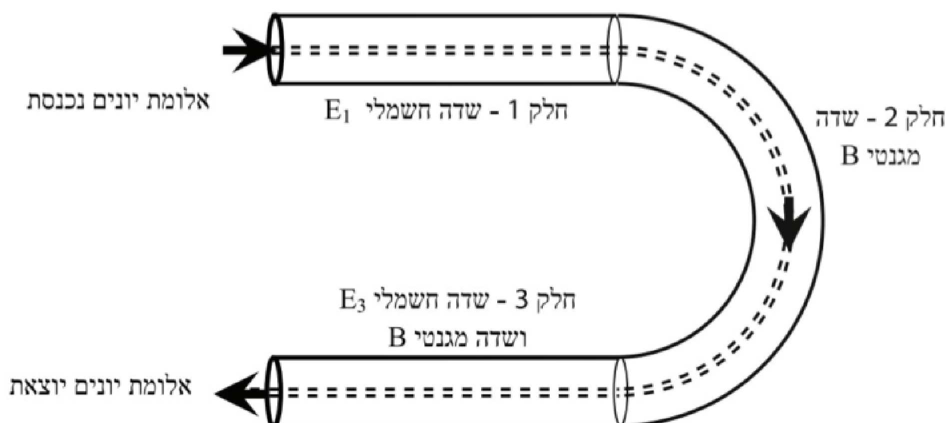
מרחק (סנטימטרים) - d	2	3	4	5	6
זווית הסטייה – α	45°	35°	27°	24°	17°

ב. הסבירו מדוע זווית הסטייה קטנה ככל שמרחיקים את התיל מהמצפן.

ג. שרטטו גרף של $\tan\alpha$ כפונקציה של $\frac{1}{d}$.

ד. מצאו בעזרת הגרף את גודל הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.

5. בתרשים שלפניכם מתוארת אלומת יונים חיוביים של ליתיום שמסתם $m = 11.6 \cdot 10^{-27}\,Kg$ ומטענם $q = 1.6 \cdot 10^{-19}\,C$. היונים נעים לאורך צינור מרוקן מאוויר בעל שלושה חלקים: חלק 1 וחלק 3 ישרים וחלק 2 הוא בצורת חצי מעגל. בחלק 1 שורר שדה חשמלי אחיד E_1 בלבד, בחלקים 2 ו–3 שורר שדה מגנטי אחיד זהה $B = 0.1T$. בחלק הישר של הצינור, חלק 3, שורר שדה חשמלי אחיד E_3 נוסף על השדה המגנטי B.



היונים נכנסים לחלק 1 במהירות התחלתית זניחה, ומואצים לאורך קו ישר עד שהם מגיעים לגבול בין חלק 1 לחלק 2 במהירות של $u = 4 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$. היונים ממשיכים לנוע במהירות שגודלה $4 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$ לאורך חלק 2 וחלק 3. כוח הכובד והשדה המגנטי של כדור הארץ זניחים.

א. מהם הכיוונים הבאים? בתשובתכם היעזרו בכיוונים במרחב הנתונים להלן (ציר z מאונך למישור הדף):



(1) כיוון E_1, השדה החשמלי בחלק 1.

(2) כיוון B, השדה המגנטי בחלקים 2 ו–3.

(3) כיוון E_3, השדה החשמלי בחלק 3.

הסבירו את קביעתכם.

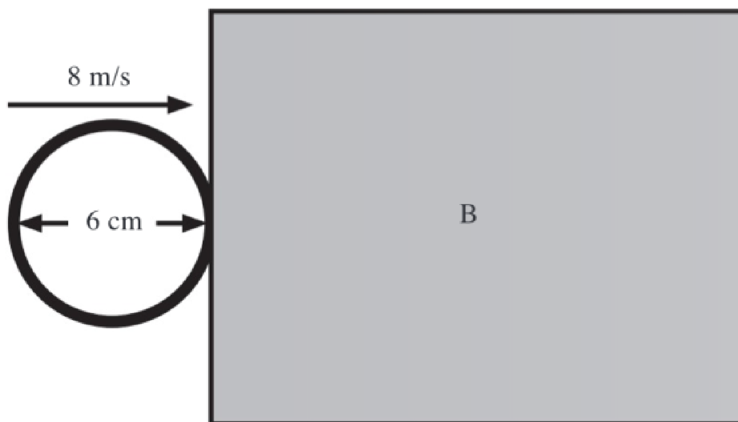
ב. חשבו את הפרש הפוטנציאלים בין קצוות חלק 1.

ג. חשבו את רדיוס המעגל שלאורכו נעים היונים בחלק 2.

ד. חשבו את גודלו של E_3, השדה החשמלי שבחלק 3.

השראה אלקטרומגנטית

6. סליל בעל 1,500 כריכות בקוטר של 6 סנטימטרים, נכנס במהירות של $v = 8\frac{m}{s}$, לתוך תחום שבו שורר שדה מגנטי אחיד $B = 0.2T$, שכיוונו אל מחוץ לדף. כיוון השדה מאונך גם למישור הסליל.



א. מצאו את כיוון הזרם הזורם בסליל במהלך כניסת הסליל לתחום (עם או נגד כיוון השעון). הסבירו כיצד קבעתם את הכיוון.

ב. מצאו את גודלו של הכא״מ המושרה הממוצע, הנוצר בסליל במהלך כניסתו לתחום.

ג. מדוע נוצר כא״מ מושרה במהלך כניסת הסליל לתחום?

בניסוי אחר הסליל ניצב במנוחה בתוך השדה, אבל מקטינים את השדה על פי הביטוי $B = B_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$, כאשר $B_0 = 0.2T$ ו – $\tau = 0.1s$ הם פרמטרים קבועים.

ד. מצאו את כיוון הזרם הזורם בסליל במקרה זה (עם או נגד כיוון השעון). הסבירו כיצד קבעתם את הכיוון.

ה. כתבו ביטוי המתאר את הכא״מ המושרה, הנוצר בסליל כפונקציה של הזמן.

פתרונות מבחן 4

1. א. השדה החשמלי בין שני לוחות טעונים הוא אחיד, וכיוונו ניצב ללוחות, לכן גם הכוח הפועל על האלקטרונים הוא קבוע וניצב ללוחות. האלקטרונים נעים במהירות קבועה בציר המקביל ללוחות, ובתאוצה קבועה בניצב ללוחות, לכן צורת המסלול היא פרבולה (בדומה לזריקה אופקית, רק כלפי מעלה).

ב. לפי צורת המסלול של האלקטרונים, כיוון הכוח החשמלי הפועל עליהם הוא למעלה. כיוון הכוח החשמלי הפועל על מטען שלילי מנוגד לכיוון השדה החשמלי, לכן כיוון השדה החשמלי הוא למטה.

ג. נמצא את הזווית לפי כיוון המהירות של האלקטרונים, לאחר שיצאו מהלוחות. נקבע את ציר x מקביל ללוחות, ואת ציר y בניצב להם:

$$\tan\alpha = \frac{v_y}{v_x}$$

המהירות בציר x קבועה, לכן $v_x = u_0$.

נמצא את v_y:

$$\begin{cases} v_y = at = \frac{F}{m}t = \frac{qE}{m}t = \frac{eE}{m}t \\ t = \frac{L}{u_0} \\ E = \frac{V}{d} \end{cases}$$

$$v_y = \frac{eE}{m}\cdot\frac{L}{u_0} = \frac{eVL}{dmu_0}$$

נציב:

$$\tan\alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{eVL}{dm_e u_0^{\,2}}$$

ד. i. לפי הביטוי שקיבלנו, אם הפרוטונים נכנסו באותה מהירות אל בין הלוחות, יש להגדיל את הפרש הפוטנציאלים V פי 1,840, כדי שגודל הזווית ישתווה לגודלה הקודם.

ii. בביטוי שקיבלנו u_0^2 נמצא במכנה. לכן אם המתח בין הלוחות לא משתנה, יש להקטין את u_0 פי $\sqrt{1840}$, כדי שגודל הזווית ישתווה לגודלה הקודם.

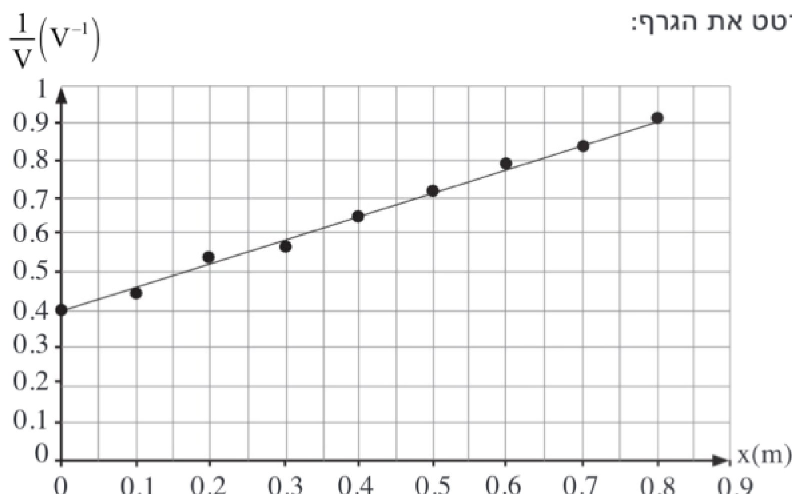
2. א. נמצא את הנוסחה המתאימה בנוסחאון. התנגדות קטע התיל AC היא:

$$R_{AC}=\frac{\rho x}{A}$$

וההתנגדות השקולה היא:

$$R_t=R_1+R_{AC}=R_1+\frac{\rho x}{A}$$

ב. נשרטט את הגרף:



ג. נמצא את הקשר התאורטי בין $\frac{1}{V}$ ל-x:

$$V=I_tR_1=\frac{\varepsilon}{R_t}R_1$$

$$\frac{1}{V}=\frac{R_t}{\varepsilon R_1}=\frac{1}{\varepsilon R_1}\left(R_1+\frac{\rho x}{A}\right)=\frac{1}{\varepsilon}+\frac{\rho}{A\varepsilon R_1}x$$

קבלנו משוואת ישר, ששיפועו $\frac{\rho}{A\varepsilon R_1}$, והוא חותך את הציר האנכי בערך של $\frac{1}{\varepsilon}$. הגרף שקיבלנו חותך את הציר האנכי בנקודה $\left(0,0.4V^{\;\;1}\right)$. לכן:

$$\frac{1}{\varepsilon}=0.4$$
$$\varepsilon=2.5V$$

הכא"מ הוא 2.5 וולט.

ד. נמצא את שיפוע הגרף, m, לפי שתי נקודות: $(0, 0.4)$, $(0.8,0.9)$:

$$m=\frac{0.9-0.4}{0.8-0}=0.625\frac{1}{Vm}$$

(יחידות השיפוע הן היחידות של ציר y, חלקי היחידות של ציר x):

ה. נציב בביטוי לשיפוע, נזכור ש: $1mm^2=10^{-6}m^2$.

$$m=\frac{\rho}{A\varepsilon R_1}$$
$$\rho=m\cdot A\varepsilon R_1=0.625\cdot0.16\cdot10^{-6}\cdot2.5\cdot0.4=1\cdot10^{-7}\Omega\cdot m$$

3. א. ראשית נביע את הזרם במעגל:

$$I=\frac{\varepsilon}{R_t}=\frac{\varepsilon}{R+r}$$

נמצא את ההספק:

$$P=I^2R=\left(\frac{\varepsilon}{R+r}\right)^2R$$
$$P=\frac{\varepsilon^2R}{(R+r)^2}$$

ב. לפי הביטוי $P=I^2R$, כאשר ההתנגדות נמוכה מאוד ההספק נמוך, כי הזרם הוא לכל היותר זרם הקצר. בערכים גבוהים של ההתנגדות הזרם שואף לאפס, לכן גם בערכים אלה ההספק נמוך.

הערה: אפשר לענות על השאלה גם לפי הביטוי לעיל.

ג. נמצא את הזרם ואת מתח ההדקים בשני מצבים לפי ההנחיה (מתח ההדקים שווה למתח על הנגד R):

(1)

$$R = 3\Omega\ ;\ P = 12W$$
$$P = I^2R$$
$$12 = I^2 \cdot 3$$
$$I = 2A$$
$$V = IR = 2 \cdot 3 = 6V$$

(2)

$$R = 9\Omega\ ;\ P = 9W$$
$$P = I^2R$$
$$9 = I^2 \cdot 9$$
$$I = 1A$$
$$V = IR = 1 \cdot 9 = 9V$$

נציב בנוסחת מתח ההדקים, ונפתור את מערכת שתי המשוואות:

$$6 = \varepsilon - 2r$$
$$9 = \varepsilon - r$$

פתרון המערכת הוא:

$$\varepsilon = 12V$$
$$r = 3\Omega$$

כא"מ המקור הוא 12 וולט, והתנגדותו הפנימית היא 3 אוהם.

ד. נחשב את הנצילות:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{IV}{I\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{6}{12} = \frac{1}{2}$$

הנצילות היא $\frac{1}{2}$ או 50%.

ה. הזרם מקסימלי כאשר התנגדות הנגד R היא אפס. הנקודה המתאימה בגרף היא ראשית הצירים, אשר בה הנגד וההספק שלו הם אפס. במצב זה הזרם הוא זרם הקצר:

$$I_{Max} = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{12}{3} = 4A$$

4. א. כאשר לא זורם זרם בתיל, מחט המצפן פונה צפונה, בכיוון הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ – $B_{E||}$. כאשר זורם זרם בתיל, הוא משרה שדה מגנטי נוסף, ומחט המצפן פונה בכיוון הרכיב האופקי של השדה המגנטי השקול.

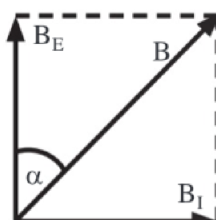
באפשרויות A ו–B כיוון השדה המגנטי שמשרה הזרם בתיל, מאונך למישור המצפן, לכן הוא לא משפיע על מחט המצפן.

באפשרות D כיוון השדה המגנטי שמשרה הזרם בתיל הוא צפונה. מכיוון שגם קודם פנתה המחט צפונה, לא תהיה סטייה של המחט.

באפשרות C תסטה המחט, כי כיוון השדה המגנטי שמשרה הזרם בתיל הוא מזרחה, לפי כלל יד ימין, וכיוון השדה המגנטי השקול סוטה מהצפון לכיוון מזרח בזווית α. ראו בתרשים שלפניכם:

ב. נביע את זווית הסטייה:

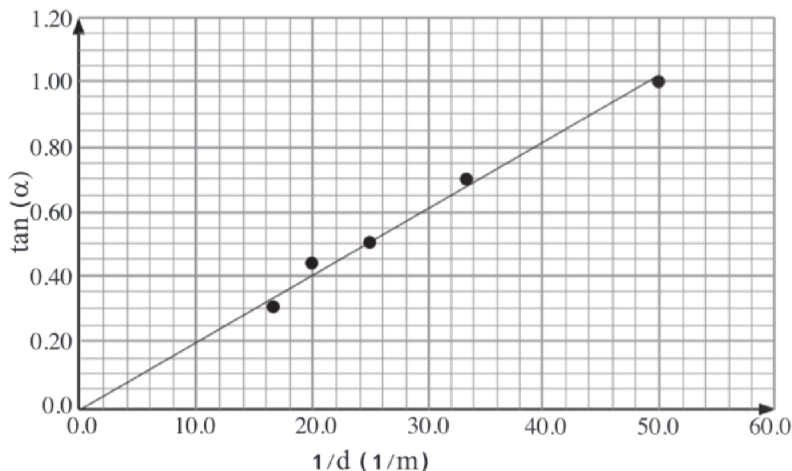
$$\tan\alpha = \frac{B_I}{B_{E||}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d \cdot B_{E||}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi B_{E||}} \cdot \frac{1}{d}$$



לפי הביטוי שקיבלנו, ככל שהמרחק d גדל, זווית הסטייה קטנה.

ג. נערוך טבלה ונשרטט את הגרף:

d (m)	A	1/d (1/m)	tanα
0.02	45	50.0	1.00
0.03	35	33.3	0.70
0.04	27	25.0	0.51
0.05	24	20.0	0.45
0.06	17	16.7	0.31



ד. נחשב את שיפוע הגרף S לפי שתי נקודות (נקפיד לבחור בנקודות מהגרף, ולא מהטבלה) $(32,0.65)$ $(0,0)$:

$$S=\frac{0.65-0}{32-0}=0.0203\text{m}$$

לפי הביטוי שקיבלנו בסעיף ב׳, שיפוע הגרף הוא:

$$S=\frac{\mu_0 I}{2\pi B_{E||}}$$

נחשב את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ – $B_{E||}$.

$$B_{E||}=\frac{\mu_0 I}{2\pi S}=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot3}{2\pi S}=\frac{2\cdot10^{-7}\cdot3}{0.0203}=3.00\cdot10^{-5}\text{T}$$

5. א. (1) כיוון E_1, השדה החשמלי בחלק 1, הוא ימינה – x. הסבר: היונים מואצים ימינה, כלומר הכוח החשמלי פועל עליהם ימינה. כיוון השדה על מטען חיובי הוא עם כיוון הכוח החשמלי.

(2) כיוון B, השדה המגנטי בחלקים 2 ו–3, הוא מתוך הדף – z. הסבר: בכניסה לחלק 2 כיוון המהירות ימינה, כיוון הכוח למטה (כלפי מרכז המעגל), ולפי כלל יד ימין כיוון השדה המגנטי הוא מתוך הדף.

(3) כיוון E_3, השדה החשמלי בחלק 3, הוא למטה $(-y)$. הסבר: מכיוון שהיונים נעים בקו ישר ובמהירות קבועה הכוח השקול עליהם מתאפס. לכן כיוון הכוח החשמלי מנוגד לכיוון הכוח המגנטי. לפי כלל יד ימין כיוון הכוח המגנטי הוא למעלה (y), ומכאן שכיוון הכוח החשמלי וכיוון השדה החשמלי הוא למטה $(-y)$

ב. נחשב את הפרש הפוטנציאלים לפי משפט עבודה אנרגיה (היונים מואצים ממהירות התחלתית זניחה, לכן האנרגיה הקינטית ההתחלתית היא בקירוב אפס):

$$w = \Delta E_k$$
$$qV_{AB} = \frac{1}{2}mu^2 - 0$$
$$V_{AB} = \frac{mu^2}{2q} = \frac{11.6\cdot 10^{-27}\cdot\left(4\cdot 10^5\right)^2}{2\cdot 1.6\cdot 10^{-19}} = 5{,}800\text{V}$$

ג. היונים נעים בהשפעת הכוח המגנטי $F = qvB\sin\alpha$. נחשב את הרדיוס לפי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F = ma$$
$$quB\sin(90°) = \frac{mu^2}{R}$$
$$R = \frac{mu}{qB} = \frac{11.6\cdot 10^{-27}\cdot 4\cdot 10^5}{1.6\cdot 10^{-19}\cdot 0.1} = 0.29\text{m}$$

ד. היונים נעים בקו ישר ובמהירות קבועה לכן:

$$|F_B| = |F_E|$$
$$quB = qE_3$$
$$E_3 = uB = 4\cdot 10^5\cdot 0.1 = 4\cdot 10^4\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

6. א. נמצא את כיוון הזרם המושרה בסליל: במהלך כניסת הסליל לתחום, השטף המגנטי גדל, לכן נוצר כא"מ מושרה, שיוצר זרם מושרה שלפי חוק לנץ יוצר שדה מגנטי מושרה במגמה להקטין את השטף המקורי. לכן כיוון השדה המגנטי המושרה הפוך מכיוון השדה המגנטי המקורי, כלומר לתוך הדף. לפי כלל הבורג, כדי שהזרם ייצור שדה מגנטי לתוך הדף, כיוונו צריך להיות **עם כיוון מחוגי השעון**.

ב. השטף המגנטי דרך הסליל כשכולו בתוך השדה הוא:

$$\Phi_B = B_{\perp}A = B \cdot \pi R^2$$

פרק הזמן שבו נכנס הסליל לתחום הוא: $\Delta t = \frac{2R}{v}$. נחשב את גודלו של הכא"מ הממוצע:

$$|\bar{\varepsilon}| = N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = N\frac{B \cdot \pi R^2}{\Delta t} = N\frac{\pi RBv}{2} = \frac{3.14 \cdot 1500 \cdot 0.03 \cdot 0.2 \cdot 8}{2} = 113V$$

ג. הכא"מ נוצר עקב שינוי בשטף על פי חוק פאראדיי.

ד. במקרה זה השטף הולך וקטן עם הזמן, הפוך ממה שמתרחש בסעיף א', לכן מגמת הזרם הפוכה גם היא לזו שבסעיף א'. כלומר, הזרם זורם נגד כיוון מחוגי השעון.

ה. נמצא את השטף כפונקציה של הזמן:

$$\Phi = B_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \pi R^2$$

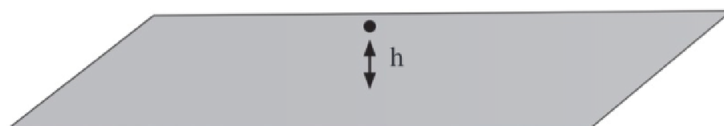
נמצא את הכא"מ המושרה לפי הנגזרת של השטף לפי הזמן:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = N\frac{B_0 \cdot \pi R^2}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 1500 \cdot \frac{0.2 \cdot \pi \cdot 0.03^2}{0.1} \cdot e^{-\frac{t}{0.1}} = 8.48 \cdot e^{-10t}$$

מבחן 5

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. טיפת שמן שמסתה 4 מיליגרמים $\left(m = 4\cdot10^{-6}\text{Kg}\right)$, טעונה במטען חיובי של $q = 5\cdot10^{-9}\text{C}$. הטיפה מרחפת בגובה h ללא תנועה מעל לוח אופקי, ריבועי, מבדד, הטעון במטען חיובי של $Q = 3.6\cdot10^{-7}\text{C}$. המטען מפוזר על הלוח בצפיפות מטען אחידה. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מה התנאי לכך שעוצמת השדה החשמלי בסביבת הטיפה תהיה: $E = 2\pi k\sigma$ (או $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$)

כאשר σ – צפיפות המטען המשטחית של הלוח?

בהמשך השאלה הניחו שהתנאי לעיל מתקיים.

ב. מצאו את אורכה של צלע הריבוע.

ג. בהנחה שהטיפה מוליכה במידת מה, היכן תהיה צפיפות האלקטרונים גדולה יותר?

בחרו באפשרות הנכונה ונמקו את בחירתכם:

(1) בצד הטיפה הקרוב ללוח.

(2) בצד הטיפה הרחוק מהלוח.

(3) בצד ימין של הטיפה.

(4) הצפיפות תהיה אחידה על פני הטיפה.

מציבים לוח אופקי נוסף, זהה בצורתו ללוח הראשון, בגובה 2h בדיוק מעליו. מטענו של הלוח הנוסף שווה בגודלו ומנוגד בסימנו למטען של הלוח הראשון.

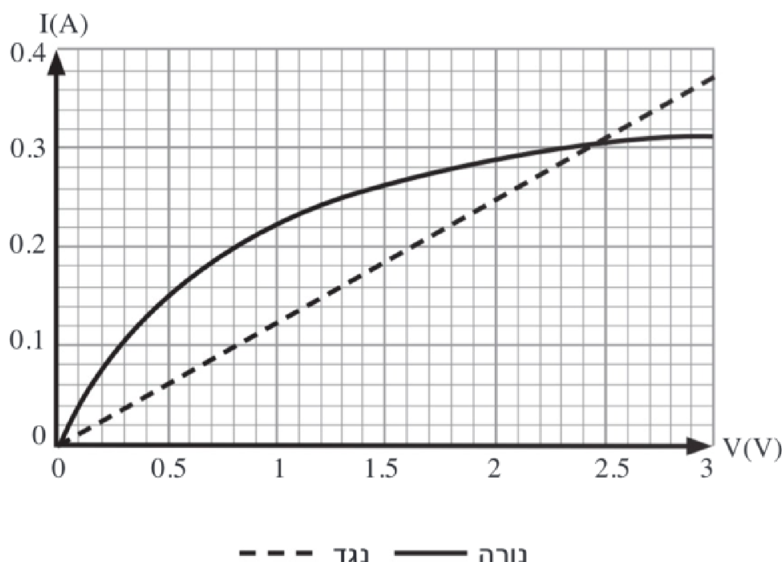
ד. מצאו את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי בסביבת הטיפה.

ה. מהי תאוצת הטיפה? מה גודלה ומה כיוונה?

.2 מור קיבל משימה לחקור את האופיין של נגד. לרשותו עומדים הנגד, ספק מתח של 3 וולט בעל התנגדות פנימית זניחה, תילים מוליכים נגד משתנה עם מגע נייד, אמפרמטר וולטמטר.

א. שרטטו מעגל חשמלי מתאים שבעזרתו אפשר לקבל על הנגד את **כל תחום המתחים** מ־0 ועד 3 וולט. הוסיפו למעגל את מכשירי המדידה. הניחו שמכשירי המדידה הם אידאליים.

נועם מציע להחליף את הנגד בנורת להט, ולחקור גם את האופיין שלה. לפניכם שני האופיינים:



ב. חשבו לפי האופיין את התנגדות הנגד.

ג. לפניכם שלושה היגדים. מהו ההיגד הנכון? הסבירו את קביעתכם.

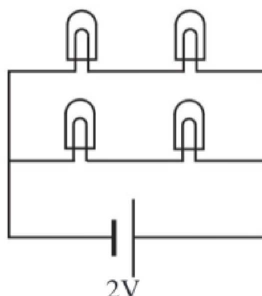
(1) התנגדות הנורה קבועה.

(2) התנגדות הנורה גדלה ככל שהזרם דרכה גדל.

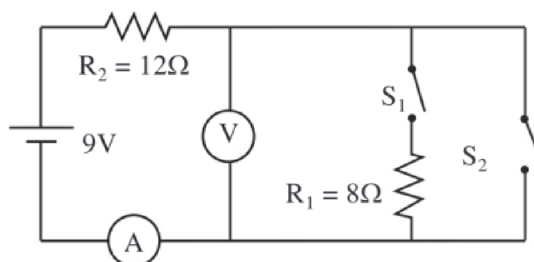
(3) התנגדות הנורה קטנה ככל שהזרם דרכה גדל.

ד. מה יכולה להיות הסיבה להבדל בין שני האופיינים?

ה. נועם ומור מרכיבים את המעגל הבא, הכולל ארבע נורות זהות לנורה הקודמת, ומקור מתח אידאלי של 2 וולט. מהו הזרם הזורם במקור המתח?



3. נתון המעגל הבא: מקור המתח ומכשירי המדידה אידאליים:



מהי קריאת הוולטמטר, ומהי קריאת האמפרמטר בכל אחד מהמצבים הבאים?

א. שני המפסקים פתוחים.

ב. המפסק S_2 פתוח, והמפסק S_1 סגור.

ג. המפסק S_2 סגור, והמפסק S_1 פתוח.

ד. שני המפסקים סגורים.

.4 עוצמת השדה המגנטי שיוצר מגנט מוט קטן במרחק r ממנו היא:

$$B_M = \frac{a}{r^3}$$





כאשר $B_{E||}$ עוצמת השדה המגנטי, r המרחק מהמגנט ו-a קבוע שמייצג את עוצמת המגנט. בטבלה הבאה מתוארות תוצאות של ניסוי למדידת עוצמת השדה המגנטי בסביבת מגנט כתלות במרחק מהמגנט. מציבים מצפן מצפון למגנט המונח בכיוון מזרח–מערב. במצב זה כיוון השדה המגנטי שיוצר המגנט הוא מזרח. מודדים את α – סטיית מחט המצפן מהצפון, במרחקים שונים מהמצפן.

1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	r(m)
19	25	34	45	58	70	80	α°

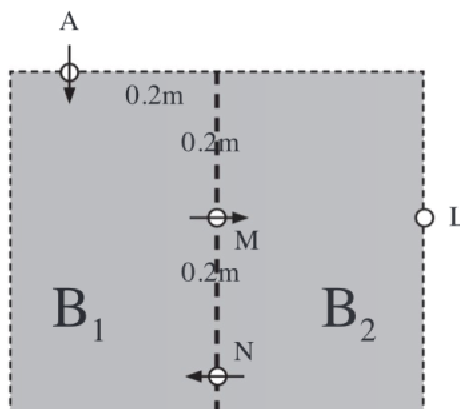
א. הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ הוא B_E. הביעו את הקשר בין α ל-r.

ב. שרטטו גרף של $\tan\alpha$ כפונקציה של $\frac{1}{r^3}$.

ג. הגרף עובר בראשית הצירים או בסמוך לה. מה המשמעות הפיזיקלית לכך?

ד. נתון: $B_{E||} = 2.9 \cdot 10^{-5}\,T$. חשבו את הקבוע a.

5. אלומת פרוטונים נכנסת דרך נקב A במהירות $v = 5 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$ לתוך אזור מלבני, שבו שורר שדה מגנטי אחיד B_1. האלומה נכנסת במאונך לצלע המלבן, ויוצאת דרך נקב M, במאונך לצלע הסמוכה של המלבן, לתוך אזור מלבני נוסף שבו שורר שדה מגנטי אחיד B_2. האלומה חוזרת לאזור של B_1 דרך נקב N במאונך לצלע המלבן. בתרשים שלפניכם מתוארת המערכת והמרחקים בין הנקבים:



א. העתיקו את התרשים למחברת, והוסיפו לו את מסלול התנועה של הפרוטונים.

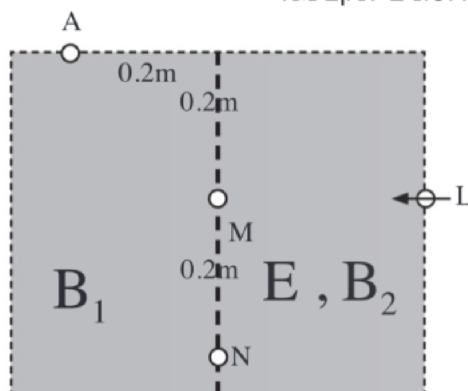
ב. חשבו את גודלו של השדה B_1. מהו כיוון השדה?

ג. חשבו את גודלו של השדה B_2. מהו כיוון השדה?

לאזור המלבני הימני מוסיפים שדה חשמלי, כך שהפרוטונים נעים בקו ישר לעבר נקב L, הנמצא בדיוק מול נקב M. במלבן השמאלי לא חל שינוי.

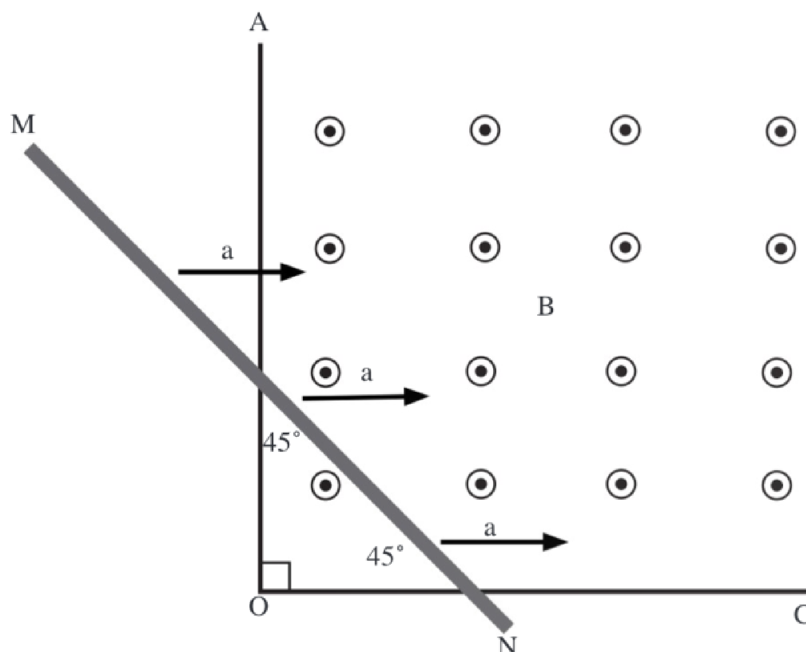
ד. חשבו את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי.

ה. משגרים אלומת פרוטונים אחרת באותה מהירות דרך נקב L לתוך המלבן הימני, במאונך לצלעו. האם יגיעו הפרוטונים לנקב M?



השראה אלקטרומגנטית

6. תיל AC מכופף בזווית ישרה O. התנגדות התיל ליחידת אורך היא: $\lambda = 0.02\frac{\Omega}{m}$. מוט מוליך MN שהתנגדותו זניחה נע ימינה, במקביל לקטע המסילה OC בתאוצה קבועה של $a = 2\frac{m}{s^2}$, כך שנוצר בכל רגע משולש ישר זווית ושווה שוקיים. בזמן $t = 0$ התחיל המוט לנוע ממנוחה מנקודה O. המערכת כולה נמצאת בשדה מגנטי $B = 0.08T$ שכיוונו מתוך הדף.



א. הראו שהשטף המגנטי דרך המשולש כפונקציה של הזמן הוא ביטוי מהצורה $\Phi = H \cdot t^4$. חשבו את הקבוע H, וציינו את יחידותיו.

ב. חשבו את גודל הכא"מ המושרה הרגעי בזמן $t = 1s$.

ג. הביעו את הזרם הזורם במשולש כפונקציה של הזמן.

ד. מה כיוון הזרם במוט? הסבירו.

ה. מהי כמות המטען שעברה במוט במהלך השנייה הראשונה לתנועתו?

פתרונות מבחן 5

1. א. התנאי הוא שהטיפה תהיה מרוחקת מקצות הלוח, כלומר h קטן בהרבה ממרחק הטיפה אל

הקצה הקרוב.

ב. הטיפה מרחפת ללא תנועה. לכן הכוח השקול הפועל עליה הוא 0, כלומר הכוח החשמלי הפועל על הטיפה שווה בגודלו למשקלה:

$$qE = mg$$
$$q \cdot 2\pi K\sigma = mg$$

ההגדרה של צפיפות המטען המשטחית היא:

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

כאשר A שטח הריבוע.

נסמן את צלע הריבוע ב-a.

$$A = a^2$$
$$q \cdot 2\pi K \cdot \frac{Q}{a^2} = mg$$
$$a = \sqrt{\frac{2\pi K \cdot q \cdot Q}{mg}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 3.6 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 10^{-6} \cdot 10}} = 1.60\text{m}$$

צלע הריבוע היא 1.60 מטר.

ג. התשובה הנכונה היא (1). האלקטרונים השליליים נמשכים אל הלוח החיובי, ומתרכזים בצד הקרוב ללוח.

ד. במצב זה יוכפל השדה החשמלי, ויהיה:

$$E = 4\pi k\sigma$$

לפי סעיף ב׳:

$$E = \frac{2mg}{q}$$

נציב:

$$E=\frac{2mg}{q}=\frac{2\cdot 4\cdot 10^{-6}\cdot 10}{5\cdot 10^{-9}}=16{,}000\frac{N}{C}$$

גודל השדה הוא $16{,}000\frac{N}{C}$, וכיוונו למעלה מהלוח החיובי אל הלוח השלילי.

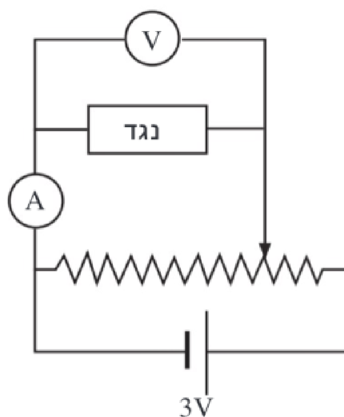
ה. הכוח החשמלי הוכפל, לכן:

$$\Sigma F=ma$$
$$2mg-mg=ma$$
$$a=g$$

(כאן a מבטא את התאוצה)

התאוצה היא g, וכיוונה למעלה.

2. א. המעגל המתאים הוא חיבור הנגד המשתנה כפוטנציומטר. את הוולטמטר מחברים במקביל לנגד הנחקר, ואת האמפרמטר מחברים בטור לנגד הנחקר.



ב. האופיין של הנגד הוא קו ישר, העובר דרך ראשית הצירים בהתאם לחוק אוהם לנגד קבוע.

$$V=IR$$
$$I=\frac{V}{R}=\frac{1}{R}\cdot V$$

שיפוע הגרף הוא $m=\frac{1}{R}$. נחשב את השיפוע m לפי שתי נקודות על הגרף $(2V,0.25A)$ $(0,0)$:

$$m=\frac{1}{R}=\frac{0.25-0}{2-0}=0.125\frac{A}{V}$$
$$R=\frac{1}{0.125}=8\Omega$$

ג. ההיגד הנכון הוא (2). הסבר: התנגדות הנורה בערך מסוים של המתח מיוצגת על ידי ההופכי של שיפוע המיתר המחבר את הנקודה עם הראשית. ככל שהמתח גדל, שיפוע המיתר קטן, כלומר ההתנגדות גדלה.

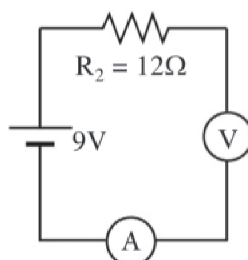
ד. נורת הלהט עשויה מתיל מתכתי שמתחמם בגלל הזרם הזורם בו, התכונה של נגד מתכתי היא שהתנגדותו עולה עם עליית הטמפרטורה.

ה. ארבע הנורות מחוברות בשני ענפים מקבילים, כשבכל ענף זוג נורות. נסמן את ההתנגדות של נורה בודדת ב־R, ונביע את ההתנגדות השקולה:

$$\frac{1}{R_t}=\frac{1}{2R}+\frac{1}{2R}=\frac{1}{R}$$
$$R_t=R$$

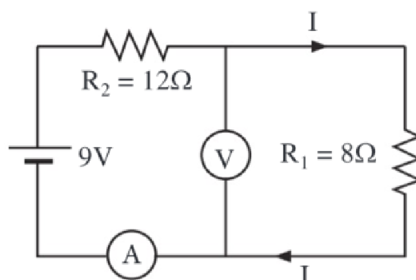
המתח על כל ענף הוא 2 וולט, לכן המתח על כל אחת מהנורות הוא 1 וולט. לפי האופיין, הזרם בנורה במתח של 1 וולט הוא 0.22 אמפר. זה הזרם בכל ענף, כלומר הזרם העובר במקור המתח הוא 0.44 אמפר.

3. א. כששני המפסקים פתוחים המעגל נראה כך:



הוולטמטר אידאלי, לכן הזרם הזורם בו אפסי. לפיכך המתח על הנגד והמתח על האמפרמטר מתאפסים, וכל מתח המקור נופל על הוולטמטר. קריאת הוולטמטר היא 9 וולט, וקריאת האמפרמטר היא 0.

ב. נשרטט את המעגל שנוצר כשהמפסק S_2 פתוח והמפסק S_1 סגור.



כעת זורם זרם דרך שני הנגדים והאמפרמטר. אפשר להתעלם מהענף של הוולטמטר, ולהתייחס אל המעגל כאל מעגל טורי פשוט. נחשב את הזרם:

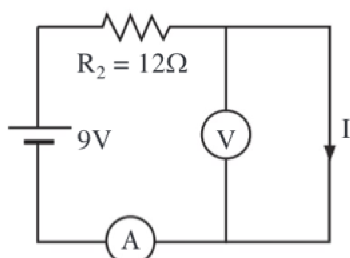
$$I = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{9}{12+8} = 0.45A$$

הוולטמטר מחובר במקביל לנגד R_1, לכן הוא מראה את המתח על נגד זה. נחשב את המתח:

$$V = IR_1 = 0.45 \cdot 8 = 3.6V$$

קריאת הוולטמטר היא 3.6 וולט, וקריאת האמפרמטר היא 0.45 אמפר.

ג. נשרטט את המעגל שנוצר כשהמפסק S_2 סגור, והמפסק S_1 פתוח.



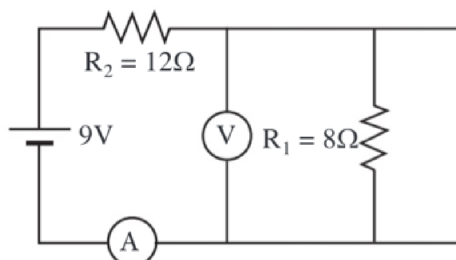
הוולטמטר מקוצר, לכן המתח עליו מתאפס. במעגל זורם זרם דרך המפסק הסגור.

נחשב את הזרם:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_2} = \frac{9}{12} = 0.75A$$

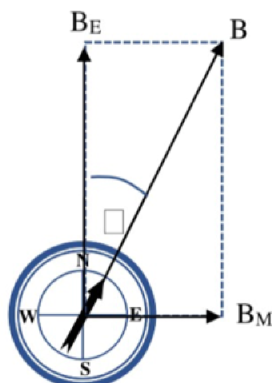
קריאת הוולטמטר היא 0, וקריאת האמפרמטר היא 0.75 אמפר.

ד. נשרטט את המעגל שנוצר כששני המפסקים סגורים.



לסגירת S_1 אין השפעה על המעגל, כי הענף ממילא מקוצר. לכן קריאת המכשירים תהיה כמו בסעיף ג׳.

4. א. נשרטט את השדה המגנטי ואת רכיביו בסביבת המצפן, ונבטא את הקשר:

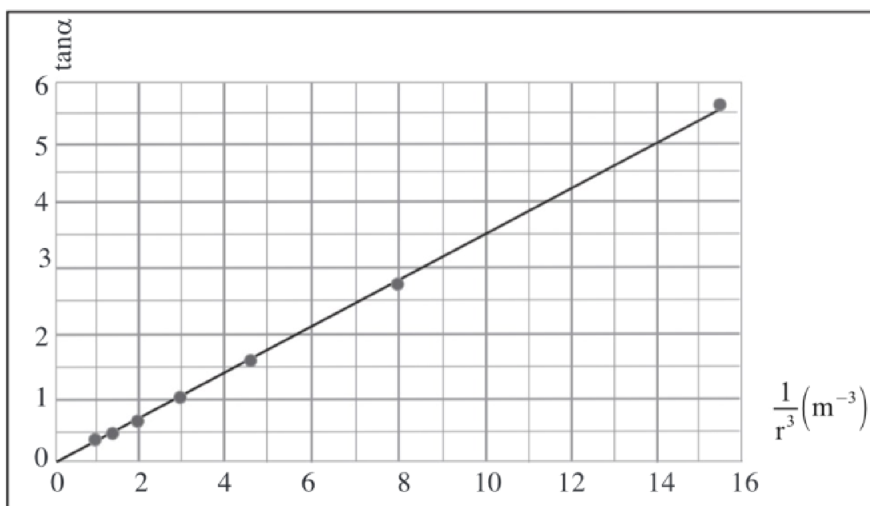


$$\tan\alpha = \frac{B_M}{B_{E_\parallel}} = \frac{a}{r^3}\cdot\frac{1}{B_{E_\parallel}}$$

$$\tan\alpha = \frac{a}{B_{E_\parallel}}\cdot\frac{1}{r^3}$$

ב. נשלים את הטבלה ונשרטט את הגרף:

1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	r(m)
19	25	34	45	58	70	80	α°
1.00	1.37	1.95	2.92	4.63	8.00	15.6	$\frac{1}{r^3}\left(m^{-3}\right)$
0.3	0.5	0.7	1.0	1.6	2.7	5.7	$\tan\alpha$



ג. המשמעות היא שבמרחק גדול מאוד זווית הסטייה היא 0, כלומר השדה המגנטי של המגנט מתאפס באינסוף.

ד. בסעיף א׳ התקבלה פונקציה של קו ישר, העובר דרך הראשית ושיפועו $S=\frac{a}{B_{E_{\parallel}}}$. נחשב את שיפוע הגרף לפי שתי נקודות שעל הגרף, $(0\ ,\ 0)$; $(14\ ,\ 5)$:

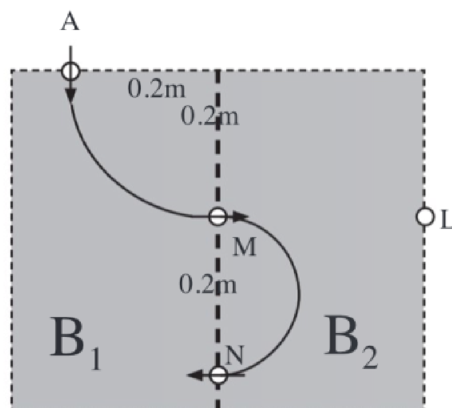
$$S=\frac{5-0}{14-0}=0.357\text{m}^3$$

נשווה ונחשב את הקבוע a:

$$S=\frac{a}{B_{E_{\parallel}}}$$

$$a=S\cdot B_{E_{\parallel}}=0.357\cdot 2.9\cdot 10^{-5}=1.04\cdot 10^{-5}\,\text{T}\cdot\text{m}^3$$

5. א. תנועת הפרוטונים בשדה מגנטי אחיד היא במסלול מעגלי. נוסיף את המסלול לשרטוט:



ב. לפי התרשים, רדיוס המסלול מ-A ל-M הוא 0.2 מטר. נחשב את השדה המגנטי:

$$qvB = ma = m\frac{v^2}{R}$$

$$B_1 = \frac{mv}{qR} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot5\cdot10^5}{1.6\cdot10^{-19}\cdot0.2} = 0.0261\text{T}$$

לפי כלל יד ימין, כיוון השדה B_1 הוא לתוך הדף.

ג. לפי התרשים, קוטר המסלול מ-M ל-N הוא 0.2 מטר. נחשב את השדה המגנטי:

$$qvB = ma = m\frac{v^2}{R}$$

$$B_2 = \frac{mv}{qR} = \frac{1.67\cdot10^{-27}\cdot5\cdot10^5}{1.6\cdot10^{-19}\cdot0.1} = 0.0522\text{T}$$

לפי צורת המסלול כיוון השדה B_2 הפוך לכיוון השדה B_1, כלומר מתוך הדף.

ד. כאשר הפרוטונים נעים ימינה, הכוח המגנטי הוא למטה. לכן דרוש כוח חשמלי שכיוונו למעלה כדי שהכוח השקול יהיה 0, והפרוטונים ינועו בקו ישר. כיוון הכוח על הפרוטונים החיוביים הוא עם כיוון השדה החשמלי, כלומר כיוון השדה החשמלי הוא למעלה. נחשב את גודלו:

$$qE = qvB$$
$$E = vB = 5 \cdot 10^5 \cdot 0.0522 = 2.61 \cdot 10^4 \frac{N}{C}$$

ה. כאשר הופכים את כיוון המהירות, כיוון הכוח המגנטי מתהפך, ואילו כיוון הכוח החשמלי נשאר כשהיה. לכן הכוחות לא יבטלו זה את זה, והפרוטונים לא ינועו בקו ישר, ולא יגיעו לנקב M.

6. נסמן את שוק המשולש ב-Δx.

א. המוט נע ימינה ממנוחה, בתאוצה קבועה a. לכן:

$$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$
$$\Delta x = \frac{1}{2}at^2$$

נביע את השטף המגנטי:

$$\Phi_B = B \cdot A = B \cdot \frac{1}{2}(\Delta x)^2 = \frac{1}{2}B\left(\frac{1}{2}at^2\right)^2 = \frac{1}{8}Ba^2t^4$$

הביטוי שקיבלנו מתאים לביטוי הנדרש כאשר:

$$H = \frac{1}{8}Ba^2$$

יחידות הקבוע H הן:

$$T \cdot \left(\frac{m}{s^2}\right)^2 = T \cdot m^2 \cdot s^{-4}$$

נחשב את ערכו:

$$H = \frac{1}{8}Ba^2 = \frac{1}{8} \cdot 0.08 \cdot 2^2 = 0.04T \cdot m^2 \cdot s^{-4}$$

ב. נחשב את הכא"מ:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$
$$\varepsilon = -4Ht^3$$
$$\varepsilon(1s) = -4\cdot 0.04\cdot 1^3 = -0.16V$$

הכא"מ המושרה הרגעי הוא 0.16 וולט. סימן המינוס מבטא את כיוון הזרם לפי חוק לנץ.

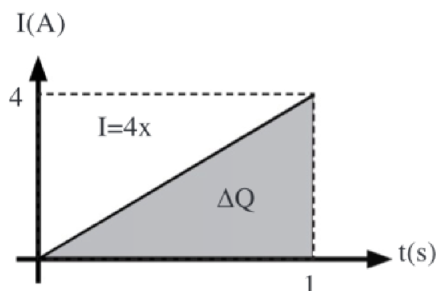
ג. ראשית, נביע את ההתנגדות של שתי השוקיים כפונקציה של הזמן:

$$R = \lambda\cdot 2\Delta x = 0.02\cdot 2\cdot\frac{1}{2}\cdot 2t^2 = 0.04t^2$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{4Ht^3}{0.04t^2} = 100Ht = 100\cdot 0.04t$$
$$I = 4t$$

ד. נמצא את כיוון הזרם לפי חוק לנץ: בגלל תנועת המוט יש הגדלה של השטף המגנטי, לכן הזרם המושרה יוצר שדה מגנטי מושרה בכיוון הפוך לכיוון השדה המקורי, כלומר לתוך הדף. לפי כלל הבורג, כיוון הזרם במוט הוא לכיוון קצה N.

ה. כמות המטען שעברה במוט שווה לשטח שמתחת לגרף של הזרם כפונקציה של הזמן. נשרטט את הגרף ונחשב את השטח:



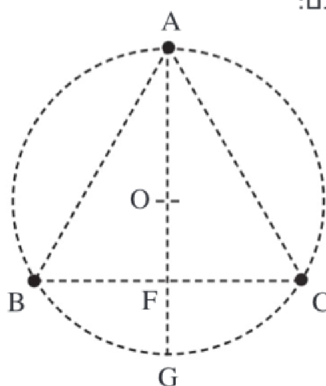
$$\Delta Q = \frac{1}{2}\cdot 1\cdot 4 = 2C$$

כמות המטען שעברה במוט במהלך השנייה הראשונה לתנועתו היא 2 קולון.

מבחן 6

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. שלושה מטענים זהים חיוביים q ניצבים בשלושת קודקודיו של משולש שווה צלעות ABC. רדיוס המעגל החוסם את המשולש הוא R, והנקודה O היא מרכזו. הקוטר AG חותך את הצלע BC בנקודה F. ראו בתרשים שלפניכם:



הערה: מהנתונים הגיאומטריים נובע: $OF = FG = \frac{1}{2}R$ ו– $BG = GC = R$.

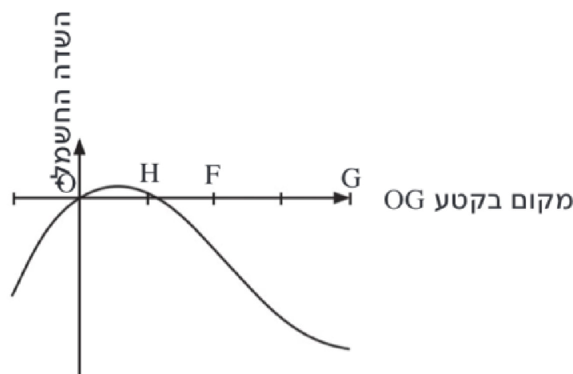
א. (1) הראו שהשדה החשמלי בנקודה O הוא 0.

(2) מה המשמעות הפיזיקלית של עובדה זו?

ב. הביעו באמצעות R, q, k את הפוטנציאל החשמלי בנקודות O ו–G. הפוטנציאל באינסוף הוא 0.

ג. הביעו באמצעות R, q, k את גודל השדה החשמלי בנקודה F.

ד. לפניכם גרף של השדה החשמלי בקטע OG, כאשר הכיוון החיובי הוא למעלה:



בגרף נראית נקודה H בין O ל-F, שבה השדה החשמלי מתאפס. בחרו בהיגד הנכון ביותר, והסבירו את בחירתכם (הפוטנציאל באינסוף הוא 0):

(1) ערכו של הפוטנציאל בנקודה H הוא הגדול ביותר בקטע OG.

(2) ערכו של הפוטנציאל בנקודה H הוא הקטן ביותר בקטע OG.

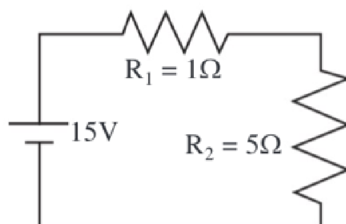
(3) ערכו של הפוטנציאל בנקודה H הוא 0.

(4) ערכו של הפוטנציאל בנקודה H הוא $-\infty$. הפוטנציאל באינסוף הוא 0.

ה. (1) הפוטנציאל במרחק של 90R ממרכז המעגל הוא $V \approx \frac{kq}{30R}$. הסבירו טענה זו.

(2) מצאו בקירוב את גודל השדה החשמלי בהמשך ישר OG, בנקודה המרוחקת 90R ממרכז המעגל.

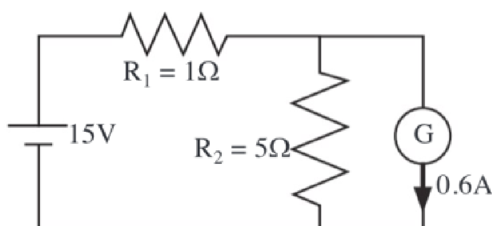
2. **שני נגדים $R_2 = 5\Omega$ ו-$R_1 = 1\Omega$ חוברו בטור למקור מתח בעל כא"מ של 15V, כשההתנגדות הפנימית זניחה. ראו בתרשים שלפניכם:**



א. חשבו את המתח על כל אחד מהנגדים.

ב. סכום המתחים על שני הנגדים שווה למתח ההדקים של המקור. על איזה עיקרון פיזיקלי מבוססת קביעה זו?

מחברים במקביל לנגד R_2 גלוונומטר (מד זרם שהתנגדותו אינה זניחה). הגלוונומטר מראה זרם של $I_G = 0.6A$. ראו בתרשים שלפניכם:

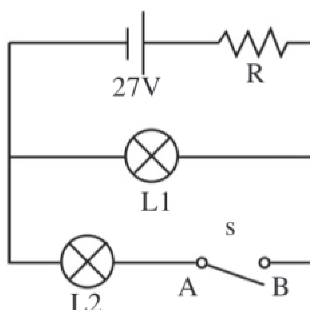


ג. הביעו את המתח על כל אחד מהנגדים בעזרת התנגדות הגלוונומטר R_G.

ד. מצאו את התנגדות הגלוונומטר.

3. נתון המעגל החשמלי שבתרשים לפניכם. מקור המתח אידאלי, התנגדות הנגד $R = 6\Omega$.
כשהמפסק s פתוח, הזרם דרך המקור 2.5A והנורה L_1 פועלת בהתאם לרשום עליה. הנורה L_2 אינה זהה בהכרח ל- L_1.

א. בגלל החום הרב היטשטש הכתוב על הנורה L_1.
שחזרו את הכתוב.



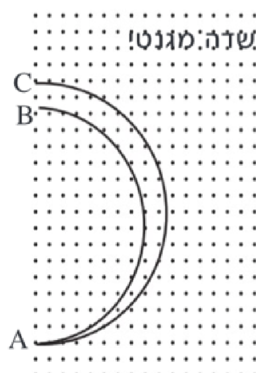


ב. איזה הדק של המפסק הפתוח, A או B, נמצא בפוטנציאל גבוה יותר ובכמה?

ג. האם לאחר סגירת המפסק עוצמת האור של L_1 תגדל, תקטן או לא תשתנה? נמקו באופן איכותי (הניחו שהנורות אינן נשרפות).

ד. מחליפים את L_2 בנורה זהה ל- L_1, מה צריכה להיות התנגדות הנגד R, כדי ששתי הנורות יפעלו בהתאם לרשום עליהן כשהמפסק סגור.

4. שני סוגים של יוני ליתיום ${}^{7}_{3}Li^{+}$ ו- ${}^{6}_{3}Li^{+}$ נכנסים בנקודה A במאונך לשדה מגנטי, ונעים חצי מעגל לפני שהם יוצאים מהשדה בנקודות B ו-C, כמתואר בתרשים שלפניכם:



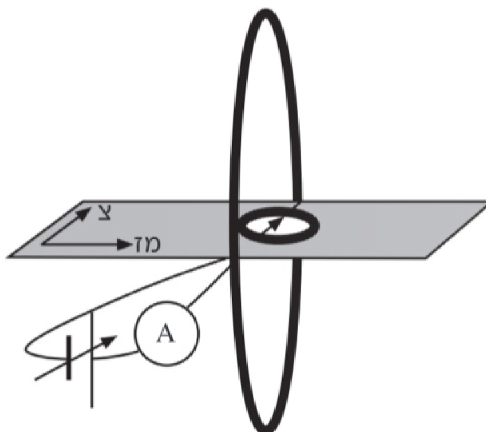
א. אילו יונים יוצאים בנקודה B ואילו בנקודה C?

ב. מה כיוון השדה המגנטי?

ג. נתון: אורך הקטע BC הוא 6 סנטימטרים. חשבו את רדיוס המסלול של כל אחד מסוגי היונים.

ד. מהירות היונים היא $2 \cdot 10^{6}\ \frac{m}{s}$. חשבו את עוצמת השדה המגנטי.

.5 נועה מנסה לחקור את השדה המגנטי של כדור הארץ בישראל בעזרת גלוונומטר טנגנטי. היא מכוונת את מישור הסליל בכיוון צפון-דרום. וכורכת סביבו **פעמיים** תיל מוליך מצופה במבדד. בעזרת מקור מתח משתנה היא יכולה לשנות את הזרם בתיל. רדיוס הסליל הוא 12cm.



א. נועה מכוונת את הזרם ל-1.6 אמפר. מהו גודלו של השדה המגנטי שיוצר הסליל במרכזו?

ב. זווית הסטייה של מחט המצפן במצב זה היא 30° ממזרח לצפון. חשבו את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ בישראל.

ג. מהו הזרם הדרוש, כדי שזווית הסטייה של המחט תהיה 45°?

ד. נועה מכוונת את הזרם כך שזווית הסטייה של מחט המצפן היא 45° ממזרח לצפון. מצב זה הוא המצב ההתחלתי. כעת היא מבצעת מספר שינויים:

(1) נועה הופכת את כיוון הזרם.

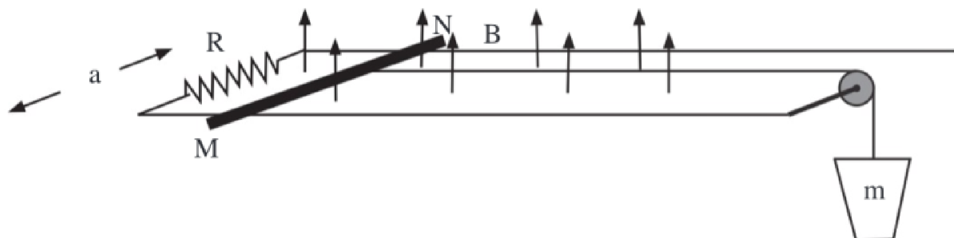
(2) נועה מחזירה את המערכת למצב ההתחלתי, ואחר כך מסובבת את כל המערכת ב-90° מערבה.

(3) נועה מחזירה את המערכת למצב ההתחלתי, ואחר כך מסובבת את כל המערכת ב-90° מזרחה.

מהי זווית הסטייה של מחט המצפן בכל אחד מהשינויים?

השראה אלקטרומגנטית

6. מוט אופקי מוליך, MN, מונח על שתי מסילות אופקיות מוליכות, ונמשך ימינה במשקולת m התלויה על חוט. שתי המסילות, שהמרחק ביניהן a, מחוברות זו לזו בנגד R, כך שנוצר מעגל חשמלי. במישור שבין שתי המסילות קיים שדה מגנטי אחיד B, הניצב למישור ומכוון למעלה. כוחות החיכוך וההתנגדות של המוט והמסילות זניחים.



א. כאשר המוט נע ימינה, מה כיוון הזרם במוט מ-M ל-N או מ-N ל-M?

ב. במקרה ראשון, המוט נע במהירות קבועה. הביעו מהירות זו.

ג. במקרה שני, המערכת משוחררת ממנוחה בזמן $t = 0$. שרטטו גרף איכותי של מהירות המוט כפונקציה של הזמן.

ד. במקרה שלישי, מחברים מקור מתח ε בטור לנגד R. מה צריך להיות גודלו של המתח ε כדי שהמוט יישאר במנוחה? הביעו באמצעות הנתונים.

פתרונות מבחן 6

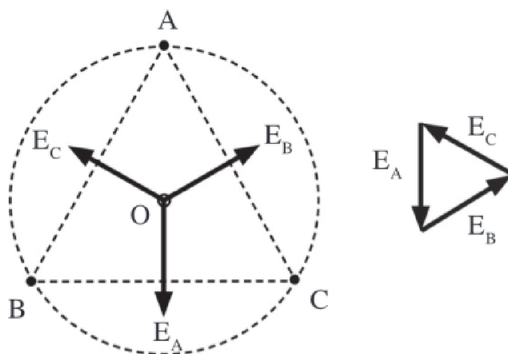
1. א. (1) אפשר להסביר את העובדה שהשדה החשמלי בנקודה O הוא 0 משיקולי סימטריה:
לדוגמה: אם נסובב את כל המערכת ב-°120 עם כיוון השעון, נקבל שוב מערכת זהה, כלומר וקטור השדה השקול מסתובב גם הוא ב-°120 אבל נשאר ללא שינוי. הווקטור היחיד שיכול להסתובב ב-°120 ולהישאר ללא שינוי הוא וקטור ה-0.

אפשר להראות זאת גם בדרך גיאומטרית של חיבור וקטורי השדות בנקודה O:

כאשר נחבר את שלושת הווקטורים נקבל:

$$\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = \vec{0}$$

ראו בתרשים שלפניכם:



(2) המשמעות הפיזיקלית של היעדר שדה חשמלי בנקודה מסוימת היא: אם נציב מטען חשמלי בנקודה זו, לא יפעל עליו כוח חשמלי.

ב. נביע את הפוטנציאל בנקודה O:

$$V_O = \frac{kq_A}{r_A} + \frac{kq_B}{r_B} + \frac{kq_C}{r_C} = 3 \cdot \frac{kq}{R}$$

נביע את הפוטנציאל בנקודה G:

$$V_G=\frac{kq_A}{r_A}+\frac{kq_B}{r_B}+\frac{kq_C}{r_C}=\frac{kq}{2R}+\frac{kq}{R}+\frac{kq}{R}=\frac{5}{2}\cdot\frac{kq}{R}$$

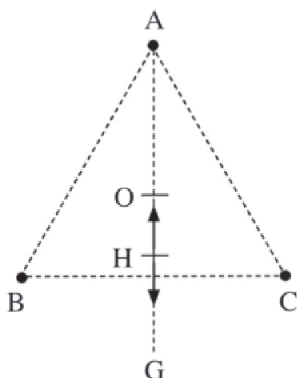
ג. השדות שמשרים המטענים שבנקודות C ו-B שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. לכן:

$$\vec{E}_B(F)+\vec{E}_C(F)=0$$

מכאן שהשדה החשמלי בנקודה F הוא השדה החשמלי שמשרה המטען שבנקודה A. נחשב את גודלו:

$$\vec{E}(F)=\vec{E}_A(F)+\vec{E}_B(F)+\vec{E}_C(F)=\frac{kq}{\left(1\frac{1}{2}R\right)^2}+0=\frac{4}{9}\cdot\frac{kq}{R^2}$$

ד. ההיגד הנכון הוא (1). הסבר: כיוון השדה החשמלי בקטע OH הוא למעלה, מ-H ל-O. כיוון השדה החשמלי בקטע HG הוא למטה, מ-H ל-G. ראו בתרשים שלפניכם:



מכיוון שכיוון השדה החשמלי הוא מהפוטנציאל הגבוה אל הפוטנציאל הנמוך, הנקודה H היא נקודת מקסימום של הפוטנציאל.

ה. (1) ממרחק של 90R ממרכז המעגל אפשר להתייחס למערכת המטענים כאל מטען נקודתי שערכו 3q. לכן:

$$V \approx \frac{k \cdot 3q}{90R} = \frac{kq}{30R}$$

(2) כמו בסעיף הקודם, נתייחס למערכת המטענים כאל מטען נקודתי שערכו 3q:

$$|E| \approx \frac{k \cdot 3q}{(90R)^2} = \frac{kq}{2{,}700R}$$

2. א. נמצא את הזרם במעגל:

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} = \frac{15}{1+5} = 2.5A$$

נחשב את המתחים:

$$V_1 = I_t R_1 = 2.5 \cdot 1 = 2.5V$$
$$V_2 = I_t R_2 = 2.5 \cdot 5 = 12.5V$$

ב. העיקרון הפיזיקלי הוא חוק שימור האנרגיה. האנרגיה שמספק המקור ליחידת מטען, שווה לאנרגיה ליחידת מטען שצורכים הנגדים.
אפשרות נוספת לבטא זאת: סכום המתחים לאורך מעגל סגור הוא 0, כי השדה החשמלי הוא שדה משמר.

ג. נחבר שנית את המתחים כדי למצוא את V_1:

$$\varepsilon = V_G + V_1$$
$$V_1 = \varepsilon - I_G R_G$$
$$V_1 = 15 - 0.6R_G$$

המתח על הנגד R_2 שווה למתח על הגלוונומטר, כי הם מחוברים במקביל. כלומר:

$$V_2 = I_G R_G = 0.6R_G$$

ד. נביע את הזרם בנגד R_2 באמצעות R_G:

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{0.6R_G}{5} = 0.12R_G$$

נביע את הזרם בנגד R_1, I_t:

$$I_t = I_G + I_2 = 0.6 + 0.12R_G$$

כעת, נשתמש בתוצאה של סעיף ג׳ ונמצא את R_G:

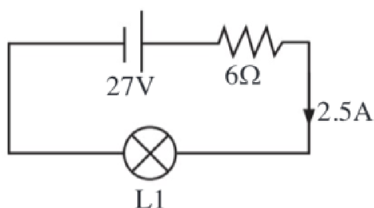
$$V_1 = I_t R_1$$
$$15 - 0.6R_G = (0.6 + 0.12R_G) \cdot 1$$
$$14.4 = 0.72R_G$$
$$R_G = 20\Omega$$

3. א. נתונים הזרם בנורה: $I = 2.5A$ והתנגדותה: $R = 6\Omega$. כשהמפסק פתוח, המעגל הוא מעגל

טורי פשוט.

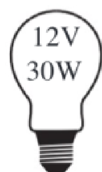
ראו בתרשים שלפניכם:

נחשב את המתח על הנורה ואת ההספק שלה:



$$\varepsilon = V_R + V_\otimes = I_t \cdot R + V_\otimes =$$
$$27 = 2.5 \cdot 6 + V_\otimes$$
$$V_\otimes = 12V$$
$$P = IV = 2.5 \cdot 12 = 30W$$

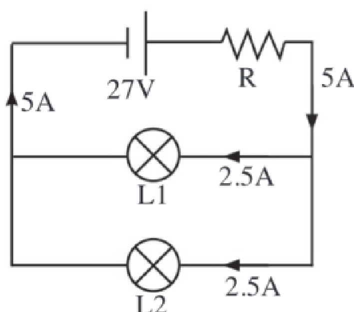
הכתוב על הנורה הוא:



ב. בנורה L_2 לא זורם זרם, לכן אפשר להתייחס אליה כאל תיל מוליך פשוט. כך שלמעשה המפסק מחובר במקביל לנורה, והפרש הפוטנציאלים בין הדקיו שווה למתח על הנורה, 12 וולט. הזרם בנורה זורם מימין לשמאל. היות והזרם זורם מהפוטנציאל הגבוה לנמוך, הדק B נמצא בפוטנציאל גבוה יותר ב–12 וולט.

ג. לאחר סגירת המפסק תקטן ההתנגדות השקולה של המעגל, הזרם דרך הנגד R יגדל, והמתח על הנגד יגדל. סכום המתחים על נגדים בטור שווה למתח המקור $\varepsilon = V_R + V_{L_1}$. לכן אם המתח על הנגד גדל, המתח על הנורה L_1 קטן.

ד. נשרטט את המעגל:



נחשב את המתח על הנגד לפי סכום המתחים:

$$\varepsilon = V_R + V_{L_1}$$
$$27 = V_R + 12$$
$$V_R = 15V$$

לפי חוק הצומת, הזרם בנגד שווה לסכום הזרמים בשתי הנורות:

$$I_R = 2.5 + 2.5 = 5A$$

נחשב את התנגדות הנגד:

$$V = I_R \cdot R$$
$$R = \frac{V}{I_R} = \frac{15}{5} = 3\Omega$$

4. א. נביע את רדיוס המסלול של מטען בשדה מגנטי:

$$F = ma$$

$$qvB = m\frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

ההבדל היחיד בין שני האיזוטופים הוא במסתם. לפי הביטוי, מתקיים יחס ישר בין מסת החלקיק לרדיוס המסלול. לכן היונים של האיזוטופים הכבדים – ${}^{7}_{3}Li^{+}$, יפגעו בנקודה C, והיונים של האיזוטופים הקלים – ${}^{6}_{3}Li^{+}$, יפגעו בנקודה B.

ב. היונים נכנסים בנקודה A כשמהירותם ימינה. הכוח המגנטי פועל עליהם כלפי מרכז המעגל, למעלה. לכן לפי כלל יד ימין, כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף.

ג. נמצא את ההפרש בין הרדיוסים:

$$AC - AB = 2R_2 - 2R_1 = 6cm$$

$$R_2 - R_1 = 3cm$$

יחס הרדיוסים הוא כיחס המסות, כלומר היחס בין מספרי המסות של האיזוטופים, כי מסת האלקטרונים זניחה. לכן:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{7}{6}$$

פתרון מערכת המשוואות הוא:

$$R_1 = R\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right) = 18cm$$

$$R_2 = R\left({}^{7}_{3}Li^{+}\right) = 21cm$$

ד. נבחר באחד האיזוטופים, ונחשב את מטענו ואת מסתו:

$$m\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right) = 6u = 6\cdot 1.66\cdot 10^{-27} = 1\cdot 10^{-26}Kg$$
$$q\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right) = e = 1.6\cdot 10^{-19}C$$

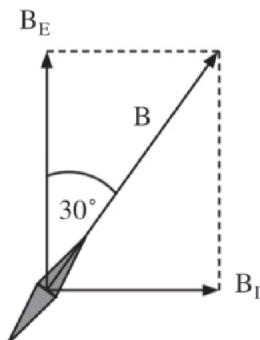
$$R\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right) = \frac{m\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right)\cdot v}{q\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right)\cdot B}$$
$$B = \frac{m\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right)\cdot v}{q\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right)\cdot R\left({}^{6}_{3}Li^{+}\right)} = \frac{1\cdot 10^{-26}\cdot 2\cdot 10^{6}}{1.6\cdot 10^{-19}\cdot 0.18} = 0.694T$$

עוצמת השדה המגנטי היא 0.694 טסלה.

5. א. נחשב את השדה לפי נוסחת השדה המגנטי במרכז סליל מעגלי דק:

$$B_I = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 2\cdot 1.6}{2\cdot 0.12} = 1.68\cdot 10^{-5}T$$

ב. נשרטט תרשים של וקטורי השדות. השדה המגנטי של הסליל פונה לכיוון מזרח, ימינה בתרשים. הרכיב המקביל של השדה המגנטי של כדור הארץ פונה צפונה, למעלה בתרשים. מחט המצפן פונה לכיוון השדה המגנטי השקול.



$$\tan\alpha = \frac{B_I}{B_{E||}}$$
$$B_{E||} = \frac{B_I}{\tan\alpha} = \frac{1.68\cdot 10^{-5}}{\tan 30^\circ} = 2.91\cdot 10^{-5}T$$

הרכיב המקביל של השדה המגנטי של כדור הארץ הוא $2.91\cdot 10^{-5}T$.

ג. כשזווית הסטייה היא 45°, הרכיב המקביל של השדה המגנטי של כדור הארץ שווה לשדה המגנטי של הסליל. נחשב את הזרם:

$$B_I = B_{E\|} = 2.91 \cdot 10^{-5} T$$

$$B_I = \frac{\mu_0 NI}{2R}$$

$$I = \frac{2RB_I}{\mu_0 N} = \frac{2 \cdot 0.12 \cdot 2.91 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2} = 2.78A$$

ד. (1) כאשר נועה הופכת את כיוון הזרם, השדה המגנטי של הסליל מתהפך ופונה מערבה. לכן זווית הסטייה תהיה 45° ממערב לצפון.

(2) סיבוב המערכת מערבה מסובב את השדה המגנטי של הסליל, כך שהוא פונה צפונה. המחט לא תסטה מהצפון.

(3) סיבוב המערכת מזרחה מסובב את השדה המגנטי של הסליל, כך שהוא פונה דרומה. שני השדות שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, לכן השדה השקול בסביבת המחט מתאפס. המחט תפנה לכיוון אקראי.

6. א. כיוון הזרם במוט הוא ככיוון הכוח הפועל על מטען חיובי הנמצא במוט, ונע איתו ימינה. לפי כלל יד ימין, הכוח הוא מ-N ל-M.

ב. כדי שתתאפס התאוצה, הכוח המגנטי הפועל על מוט צריך להיות שווה למשקל המשקולת:

$$F_B = IBL = IBa = mg$$

נביע את הזרם:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBa}{R}$$

נציב:

$$IBa = mg$$

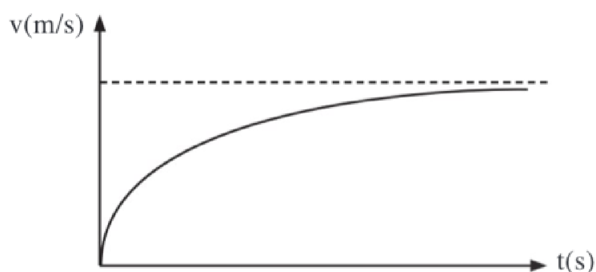
$$\frac{vBa}{R} \cdot Ba = mg$$

$$v = \frac{mgR}{B^2a^2}$$

וקיבלנו את המהירות הקבועה:

$$v = \frac{mgR}{B^2a^2}$$

ג. עם שחרור המערכת, היא מתחילה לנוע ימינה בתאוצה השווה לתאוצת הכובד g. ככל שהמהירות גדלה, כך שקול הכוחות הפועלים על המוט קטן, לכן (לפי החוק השני של ניוטון) גם התאוצה קטנה. כאשר התאוצה מתקרבת ל-0, המהירות מתקרבת לערך שקיבלנו בסעיף הקודם, כך שמהירות זו היא אסימפטוטה אופקית. הגרף נראה כך:



ד. מצב מנוחה הוא מצב התמדה, כמו בסעיף א׳ הכוח המגנטי הפועל על מוט צריך להיות שווה למשקל המשקולת:

$$F_B = IBa = mg$$

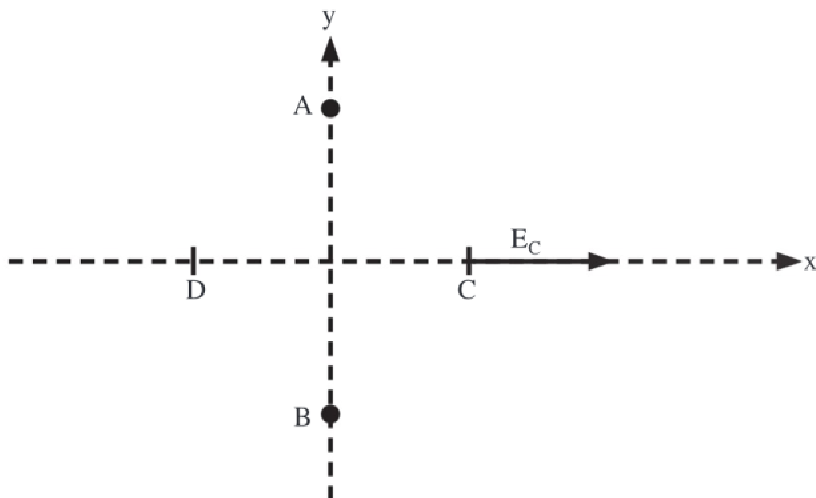
$$\frac{\varepsilon}{R} \cdot Ba = mg$$

$$\varepsilon = \frac{mgR}{Ba}$$

מבחן 7

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. שני מטענים זהים נמצאים בנקודות $A(0,0.4\text{m})$ $B(0,-0.4\text{m})$ במערכת הצירים. עוצמת השדה החשמלי השקול שמשרים שני המטענים בנקודה $C(0.3\text{m},0)$ היא $5,400\frac{\text{N}}{\text{C}}$, וכיוון השדה הוא עם הכיוון החיובי של ציר ה-x, ימינה.



א. חשבו את גודל המטענים. מהו סימנם?

ב. מהו השדה החשמלי בנקודות הבאות?

(1) ראשית הצירים.

(2) $D(-0.3\text{m},0)$.

(3) רחוק מאוד מהמטענים.

ג. שרטטו גרף איכותי של השדה החשמלי לאורך ציר ה-x כפונקציה של x (הכיוון החיובי ייחשב ימינה).

ד. שרטטו גרף של הפוטנציאל לאורך ציר ה-x כפונקציה של x.

2. **הכא"מ של סוללה גדול בדרך כלל מהרשום עליה**, הערך הרשום על הסוללה הוא מתח ההדקים שלה במצב של שימוש סביר. מורן המהנדס צריך לתכנן סוללה, כך שיהיה רשום עליה 4V. שימוש סביר בסוללה זו מוגדר כצרכן הצורך 0.5 ואט.

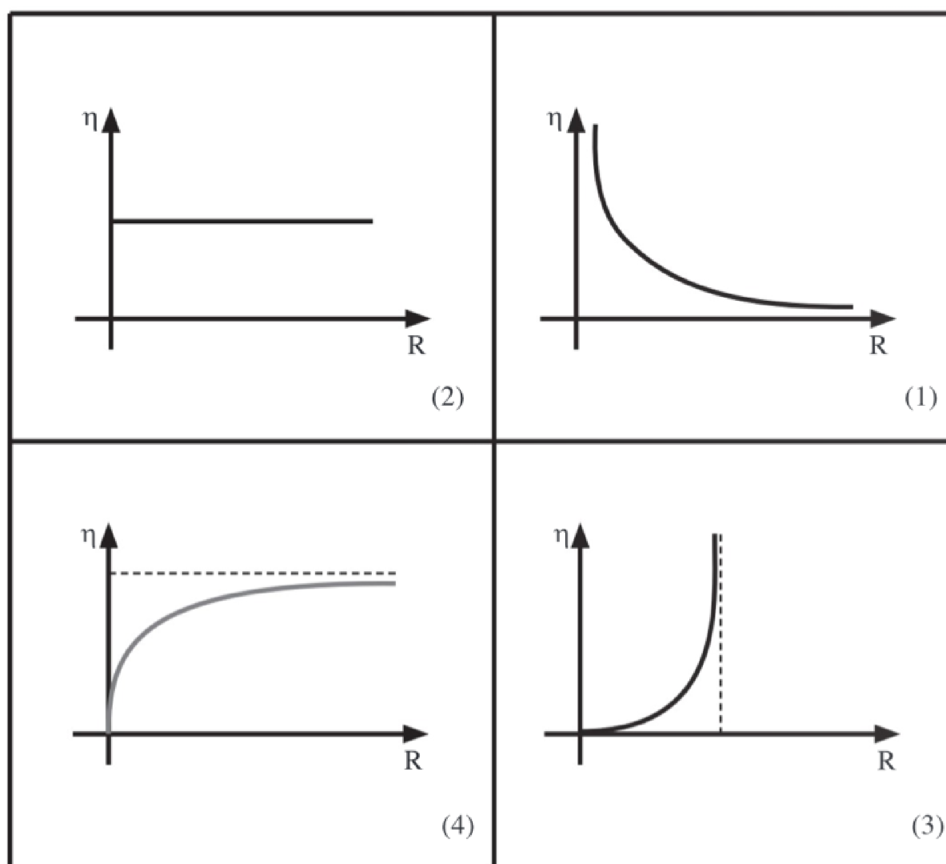
א. מהו הזרם שעובר בסוללה בשימוש סביר?

דרישה נוספת היא שהנצילות של הסוללה בשימוש סביר תהיה 80 אחוז.

ב. מהם הכא"מ וההתנגדות הפנימית הנדרשים?

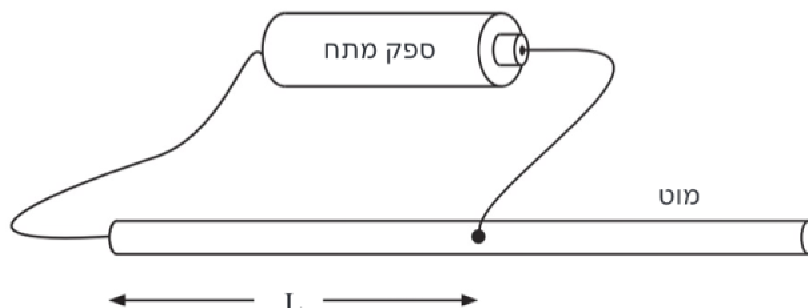
ג. אם יחברו לסוללה נורה של 4V 2W, האם היא תאיר באופן תקין?

ד. לפניכם ארבעה גרפים. איזה גרף יכול לתאר את נצילות הסוללה כפונקציה של התנגדות הצרכן המחובר אליה?



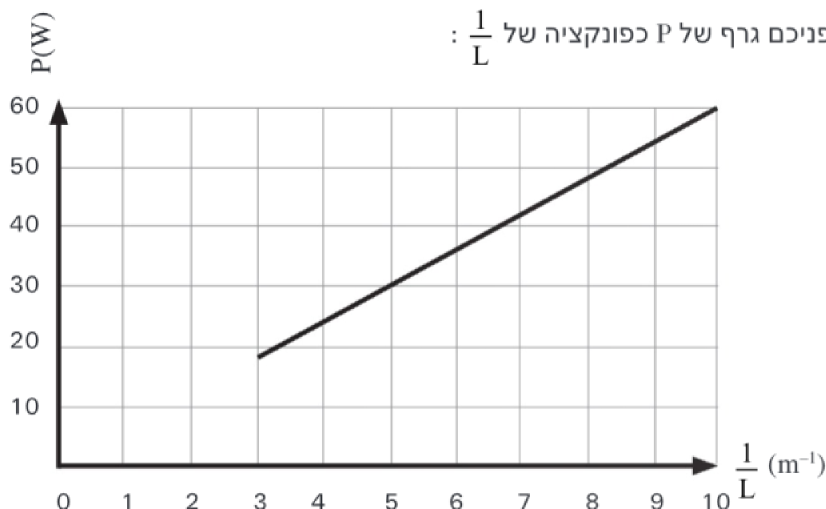
3. מוט אלומיניום בעל שטח חתך A והתנגדות סגולית ρ, מחובר לספק מתח בעל כא"מ ε, כך שהמרחק בין שני החיבורים הוא L. התנגדות התילים המוליכים וההתנגדות הפנימית של הספק זניחות. ראו בתרשים שלפניכם:

במוט מתפתח הספק P.



א. הביעו את P, כפונקציה של ε, ρ, L, A.

לפניכם גרף של P כפונקציה של $\frac{1}{L}$:



ב. הסבירו מדוע הגרף המתקבל הוא קו ישר.

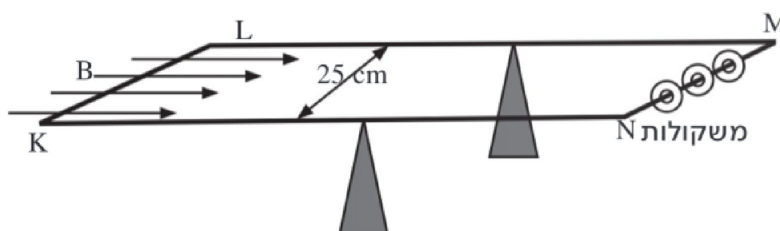
ג. הראו שיחידות המידה של ההתנגדות הסגולית בשיטת היחידות S.I. הן $\Omega \cdot m$.

נתון: $\varepsilon = 2V$

$A = 4 \cdot 10^{-8} m^2$

ד. חשבו על פי הגרף את ההתנגדות הסגולית של אלומיניום.

.4 המערכת הבאה נקראת מאזני זרם. המסגרת KLMN נושאת זרם ונמצאת בשיווי משקל. על הצלע MN תלויות משקולות שמסת כל אחת מהן היא חצי גרם והצלע KL, שאורכה 25Cm , נמצאת בשדה מגנטי B, שכיוונו מקביל לצלע המסגרת KN. מקור המתח אינו נראה בתרשים.



א. הסבירו כיצד המסגרת מאוזנת, על אף שתלויות משקולות רק בצד אחד שלה.

ב. מה כיוון הזרם במסגרת, מ-L ל-K או מ-K ל-L? נמקו.

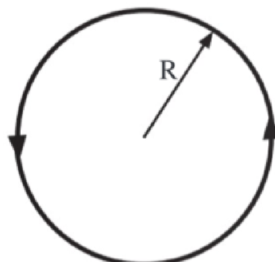
ג. כדי לכייל את המאזניים נתלה מספר שונה של משקולות, ונמדוד את הזרם שיוצר שיווי משקל.

מספר משקולות	0	1	2	3	4	5	6	7
I(A)	0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.8

שרטטו גרף של הזרם כפונקציה של מספר המשקולות.

ד. חשבו על פי הגרף את גודל השדה המגנטי B.

.5 פרוטון נע במגמה נגד כיוון השעון, בתוך שדה מגנטי אחיד, במסלול מעגלי שרדיוסו R ובתדירות f.



בשאלה זו נתונים גם הקבועים הפיזיקליים הידועים.

א. מה כיוון השדה המגנטי?

ב. הביעו את גודלו של השדה מגנטי באמצעות התדירות f.

אלקטרון וחלקיק a נעים במסלול מעגלי באותו שדה מגנטי.

ג. (1) הביעו באמצעות f את תדירות הסיבוב של האלקטרון.

(2) הביעו באמצעות f את תדירות הסיבוב של חלקיק ה–a

ד. מוסיפים לשדה המגנטי שדה חשמלי אחיד. הביעו את גודלו ומצאו את כיוונו של השדה החשמלי הדרוש כדי שהפרוטון ינוע כלפי מעלה בקו ישר ובמהירות קבועה?

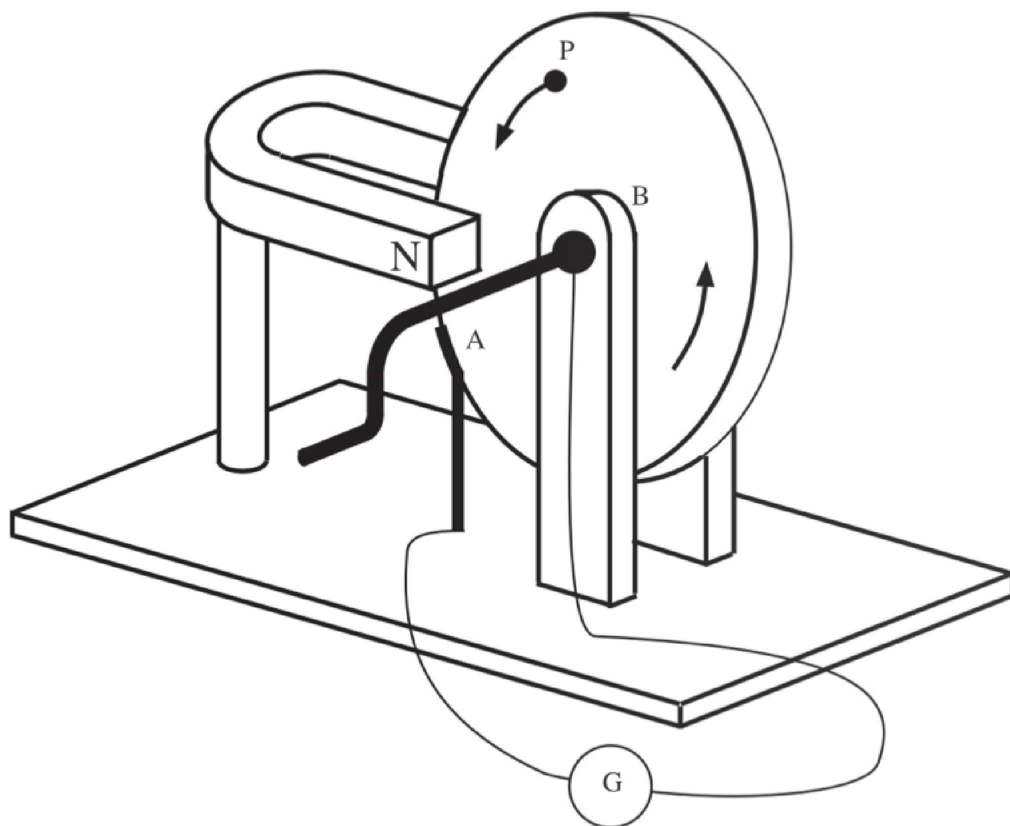
השראה אלקטרומגנטית

.6 מייקל פאראדיי (1867–1791) היה פיזיקאי בריטי שתרם תרומה רבה לפיתוח התורה האלקטרומגנטית. פאראדיי גילה את ההשראה האלקטרומגנטית, ובעזרתה המציא את הדינמו, שהוא מכשיר הממיר אנרגיה מכנית לאנרגיה חשמלית. בזכות הדינמו נפתחה בפני האנושות האפשרות לספק חשמל לכל בית ובית. הדינמו של פאראדיי מבוסס על דסקת נחושת המסתובבת סביב צירה בין שני קטביו של מגנט.

> כששאל שר האוצר הבריטי: איזו תועלת יכולה לצמוח מהמצאה מוזרה זו? ענה לו פאראדיי: "יום אחד, אדוני, עוד תוכל לגבות על זה מסים".

בתרשים הבא מתואר הדינמו של פאראדיי: דסקת הנחושת מסתובבת נגד כיוון השעון, הקוטב הצפוני של המגנט N פונה אל הקורא. הקוטב הדרומי S מוסתר על ידי הדסקה,

ואינו נראה בתרשים. הצד החיצוני של הדסקה נוגע ברציפות במגע הגמיש A, שאליו מחובר גלוונומטר בתיל מוליך. ההדק השני של הגלוונומטר מחובר בתיל מוליך נוסף אל ציר הדסקה, כך שקיים מגע רצוף בין התיל למרכז הדסקה. כשהדסקה מסתובבת, הגלוונומטר מראה על זרם חשמלי העובר דרכו.



א. מה כיוון השדה המגנטי שיוצר המגנט?

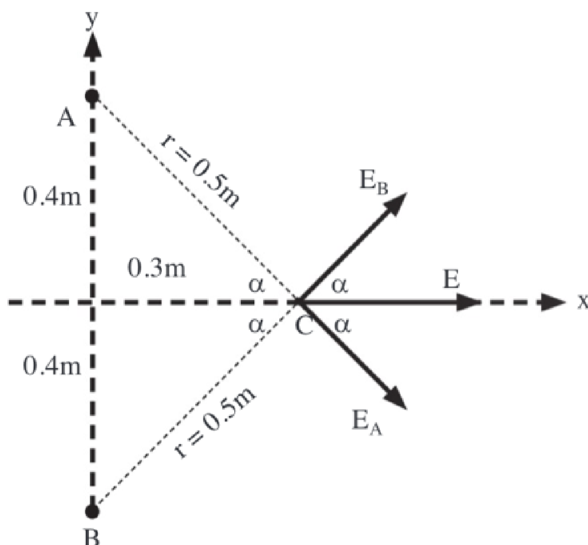
ב. מה כיוון הכוח הפועל על אלקטרון חופשי בנקודה P הנע עם הדסקה כלפי מטה?

ג. מה כיוון הזרם בגלוונומטר, מ-A ל-B או מ-B ל-A?

ד. מה כיוון הכוח שמפעילה הדסקה המסתובבת על המגנט (בדרך כלל, נחושת אינה נמשכת למגנט)?

פתרונות מבחן 7

1. א. סימן המטענים הוא חיובי, כי כיוון השדה הוא מהמטענים החוצה. ראו בתרשים שלפניכם:



נחשב את גודל המטענים – q. ראשית נחשב את r:

$$r^2 = 0.3^2 + 0.4^2$$
$$r = 0.5\text{m}$$

רכיב y של השדה בנקודה C מתאפס. נחבר את רכיבי ה–x של שני השדות שיוצרים שני המטענים בנקודה C, ונקבל את השדה השקול:

$$E_C = E_{AX} + E_{BX} = \frac{kq}{r^2}\cos\alpha + \frac{kq}{r^2}\cos\alpha$$
$$5400 = 2\cdot\frac{kq}{r^2}\cos\alpha = 2\cdot\frac{9\cdot10^9 q}{0.5^2}\cdot0.6 = 4.32\cdot10^{10}q$$
$$q = \frac{5400}{4.32\cdot10^{10}} = 1.25\cdot10^{-7}\text{C}$$

גודל המטענים הוא $1.25\cdot10^{-7}\text{C}$.

הערה: $\cos\alpha=\frac{0.3}{0.5}=0.6$.

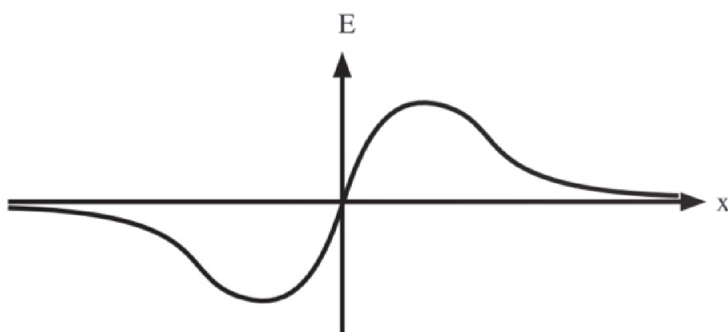
ב. (1) השדה בראשית הצירים מתאפס, כי השדות שיוצרים המטענים שווים בגודלם ומנוגדים

בכיוונם.

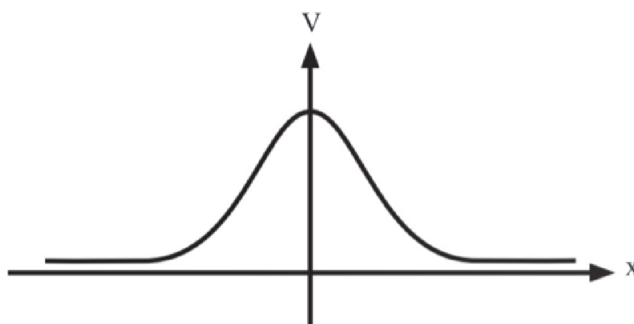
(2) גודל השדה בנקודה D הוא $5{,}400\frac{\text{N}}{\text{C}}$ שמאלה, משיקולי סימטריה.

(3) השדה במרחק אינסופי הוא 0, כי בביטוי $\left|E_x\right|=2\cdot\frac{kq}{r^2}\cos\alpha$ המרחק r הוא במכנה.

ג. נשרטט את הגרף לפי הסעיפים הקודמים:



ד. נזכור שפוטנציאל הוא גודל סקלרי, ללא כיוון. לכן הפוטנציאל הוא מרבי בראשית הצירים, שכן זו הנקודה הקרובה ביותר אל המטענים. כמו כן הפוטנציאל תמיד חיובי, כי המטענים חיוביים, והוא הולך וקטן ככל שמתרחקים מהראשית. גרף הפוטנציאל הוא:



2. א. נחשב את הזרם בצרכן ואת ההתנגדות שלו. נתוני הצרכן הם:

$$P = 0.5W$$
$$V = 4V$$

לכן:

$$P = IV$$
$$I = \frac{P}{V} = \frac{0.5}{4} = 0.125A$$
$$V = IR$$
$$R = \frac{V}{I} = \frac{4}{0.125} = 32\Omega$$

הזרם בסוללה שווה לזרם בצרכן, כלומר 0.125 אמפר.

ב. הנצילות η מוגדרת כיחס בין ההספק שמקור המתח מספק לצרכנים, לבין ההספק שהוא עצמו צורך.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{IV}{I\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon}$$
$$0.8 = \frac{4}{\varepsilon}$$
$$\varepsilon = 5V$$

נביע את הנצילות לפי הנגדים:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{(R+r)}$$
$$0.8 = \frac{32}{32+r}$$
$$25.6 + 0.8r = 32$$
$$r = 8\Omega$$

כא״מ הסוללה הוא 5 וולט, וההתנגדות הפנימית שלה היא 8 אוהם.

ג. נחשב את התנגדות הנורה:

$$P = \frac{V^2}{R}$$
$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{4^2}{2} = 8\Omega$$

נחשב את ההספק של הנורה בפועל:

$$\begin{cases} P = I^2R \\ I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{5}{8+8} = 0.3125A \end{cases}$$

$$P = 0.3125^2 \cdot 8 = 0.781W$$

ההספק שבו תאיר הנורה קטן מ-$2W$, לכן היא לא תאיר באופן תקין.

ד. הגרף הנכון הוא גרף (4) לפי הביטוי: $\eta = \frac{R}{(R+r)}$

3. א. ההתנגדות של התיל נתונה בנוסחה שבנוסחאון:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

התנגדות התילים והספק זניחה. לכן ההספק הוא:

$$P = I \cdot V_{AB} = \frac{\varepsilon}{R} \cdot \varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R}$$

נציב:

$$P = \frac{\varepsilon^2 A}{\rho L}$$

$$P = \frac{\varepsilon^2 A}{\rho} \cdot \frac{1}{L}$$

ב. הביטוי שקיבלנו מתאים לנוסחה של קו ישר העובר בראשית הצירים, ששיפועו $a = \frac{\varepsilon^2 A}{\rho}$.

ג. נביע את ההתנגדות הסגולית ונחשב את היחידות:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m$$

ד. נבחר בשתי נקודות:. $(10,60)$ $(5,30)$ נחשב את השיפוע:

$$a = \frac{\Delta P}{\Delta \frac{1}{L}} = \frac{60-30}{10-5} = 6W \cdot m$$

נשווה לשיפוע שקיבלנו בסעיף ב':

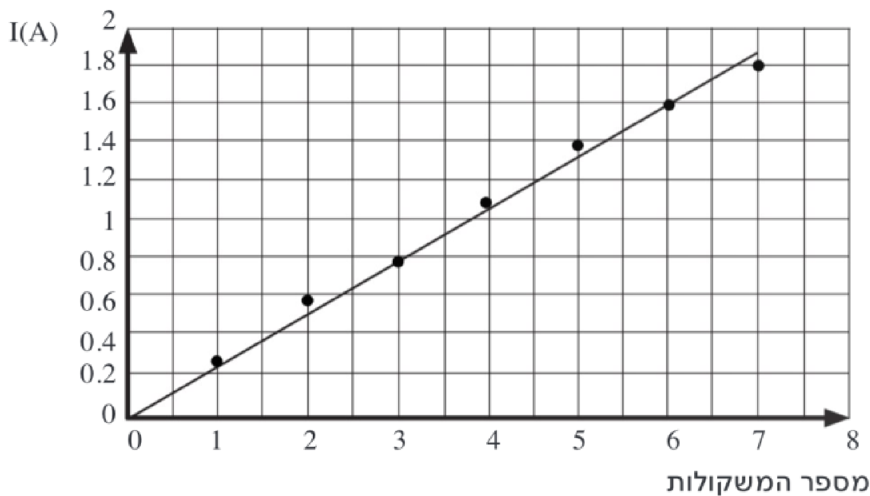
$$a = \frac{\varepsilon^2 A}{\rho}$$
$$6 = \frac{2^2 \cdot 4 \cdot 10^{-8}}{\rho}$$
$$\rho = 2.67 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

4. א. המסגרת מאוזנת כי השדה המגנטי מפעיל כוח על צלע התיל KL כלפי מטה, כך שנוצר שיווי

משקל.

ב. כיוון הכוח המגנטי הפועל על צלע התיל KL הוא כלפי מטה. לכן לפי כלל יד ימין, הזרם הוא מ-K ל-L.

ג. נשרטט את הגרף:



ד. לפי סעיף א׳, המשקל הכולל של המשקולות שווה לכוח המגנטי על צלע התיל KL.
נסמן את מסתה של משקולת אחת ב־m, ונביע את הזרם I כפונקציה של מספר המשקולות n:

$$n \cdot mg = IBL$$
$$I = \frac{mg}{BL} n$$

התקבלה פונקציה של קו ישר, העובר דרך ראשית הצירים ושיפועו $S = \frac{mg}{BL}$.

נחשב את שיפוע הישר שהתקבל בגרף לפי שתי נקודות: $(4.5,1.2)$; $(0,0)$:

$$S = \frac{1.2-0}{4.5-0} = 0.267A$$

נשווה:

$$S = \frac{mg}{BL}$$
$$B = \frac{mg}{SL}$$
$$B = \frac{0.0005 \cdot 10}{0.267 \cdot 0.25} = 0.075T$$

גודל השדה המגנטי הוא 0.075 טסלה.

5. א. כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף, לפי כלל יד ימין.

ב. נביע את גודלו של השדה המגנטי לפי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F = m_p a$$

$$\begin{cases} q_p vB = m_p \omega^2 R \\ v = \omega R \end{cases}$$

$$e \cdot \cancel{\omega} \cancel{R} \cdot B = m_p \omega^{\cancel{2}} \cancel{R}$$

$$B = \frac{m_p \omega}{e} = \frac{m_p \cdot 2\pi f}{e}$$

$$B = \frac{2\pi f \cdot m_p}{e}$$

ג. (1) לפי הביטוי שקיבלנו:

$$f = \frac{eB}{2\pi m_p}$$

$$f_e = \frac{eB}{2\pi m_e}$$

$$\frac{f_e}{f} = \frac{m_p}{m_e}$$

$$f_e = \frac{m_p}{m_e} f$$

(2) נציב בביטוי שקיבלנו $\begin{matrix} m_\alpha = 4m_P \\ q_\alpha = 2e \end{matrix}$:

$$f = \frac{eB}{2\pi m_p}$$

$$f_\alpha = \frac{2eB}{2\pi \cdot 4m_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{eB}{2\pi m_p}$$

$$f_\alpha = \frac{1}{2} f$$

ד. כיוון הכוח המגנטי שפועל על הפרוטון בתנועתו למעלה הוא שמאלה. לכן כיוון הכוח החשמלי צריך להיות ימינה, כדי שהכוח השקול ישווה ל-0. מטען הפרוטון הוא חיובי, לכן גם כיוון השדה החשמלי צריך להיות ימינה. נביע את גודלו:

$$F_E = F_B$$

$$eE = evB = ev\frac{2\pi f \cdot m_p}{e}$$

$$E = v \cdot \frac{2\pi f \cdot m_p}{e}$$

נציב בביטוי שקיבלנו - $v = \omega R = 2\pi f R$:

$$E = 2\pi f R \cdot \frac{2\pi f \cdot m_p}{e}$$

$$E = \frac{4\pi^2 m_p f^2 R}{e}$$

6. א. כיוון השדה המגנטי מחוץ למגנט הוא תמיד מהקוטב הצפוני של המגנט אל הקוטב הדרומי, כלומר לתוך הדף.

ב. האלקטרון נע למטה, כיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף. כלל יד ימין מראה את כיוון הכוח הפועל על מטען חיובי - ימינה, לכיוון מרכז הדסקה. אבל לאלקטרון מטען שלילי, לכן כיוון הכוח הפועל עליו הפוך, כלומר שמאלה, לכיוון היקף הדסקה.

ג. כיוון הזרם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים, כלומר לכיוון מרכז הדסקה, מ-A ל-B. לכן הזרם בגלוונומטר זורם מ-B ל-A.

ד. לפי חוק לנץ, הכוח הפועל על הדסקה מנוגד לכיוון תנועתה, כי אחרת הייתה נוצרת אנרגיה יש מאין. מכיוון שהדסקה נעה בסביבת המגנט כלפי מטה, המגנט מפעיל עליה כוח כלפי מעלה. ולפי החוק השלישי של ניוטון, הדסקה מפעילה על המגנט כוח כלפי מטה.

מבחן 8

ענו על שלוש מן השאלות 6-1

1. כדור מתכת A שרדיוסו 12Cm טעון במטען חשמלי q, כך שהפוטנציאל שלו הוא 1,500V.

א. מצאו את מטען הכדור ואת סימנו.

ב. היכן צפיפות האלקטרונים גדולה יותר, במרכז הכדור או על פניו? נמקו.

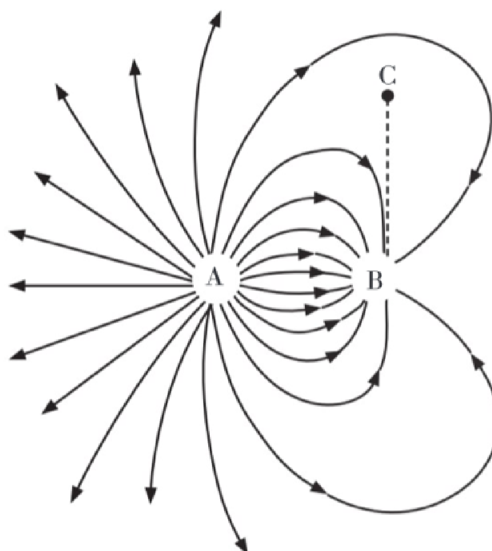
מחברים בתיל מוליך את הכדור לכדור מתכת נוסף B, לא טעון שרדיוסו 18 Cm, הנמצא רחוק ממנו, ומחכים זמן מה.

ג. חשבו את כמות המטען שעברה בתיל.

ד. האם אלקטרונים זרמו מ-A ל-B או ההפך?

ה. מנתקים את התיל ואחר כך מאריקים את כדור A. במצב זה (בלי לנתק את ההארקה) מקרבים את כדור B ל-A. תארו מה יתרחש בכדור A כתוצאה מכך.

2. בתרשים שלפניכם מתוארים קווי שדה שיוצרים שני מטענים A ו-B, שמרחקם זה מזה הוא d.



א. מה הסימן של כל אחד מהמטענים? נמקו.

ב. ידוע שאחד המטענים גדול פי 2 בערכו המוחלט מהמטען האחר. איזה מהם? נמקו.

ג. מצאו נקודה במישור הדף, אבל שאינה באינסוף, שהשדה החשמלי בה מתאפס. הביעו את תשובתכם באמצעות d.

ד. מצאו את כיוון השדה החשמלי בנקודה C, הנמצאת במרחק d מנקודה B, במאונך לישר AB. ראו בתרשים שלפניכם.

3. תלמידה מנסה למצוא את הכא"מ ואת ההתנגדות הפנימית של סוללה חשמלית. ברשותה של התלמידה מספר נגדים זהים של 10Ω. התלמידה מחברת מספר משתנה של נגדים בטור למקור המתח, ומודדת את הזרם המתקבל במעגל באמפרמטר חסר התנגדות.

$R(\Omega)$	$I(mA)$	$\frac{1}{I}\left(A^{-1}\right)$
10	125	
20	100	
30	80	
40	65	
50	55	

א. שרטטו את המעגל שהרכיבה נועם, במדידה אשר בה השתמשה בשלושה נגדים.

ב. שרטטו גרף של $\frac{1}{I}$ כפונקציה של R.

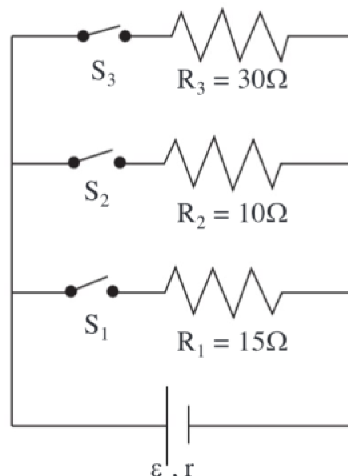
ג. מצאו בעזרת הגרף את הכא"מ ואת ההתנגדות הפנימית של הסוללה.

ד. נועם מחברת את שני הדקי המקור ישירות לאמפרמטר בסעיף א' (האמפרמטר לא נשרף).

(1) מהו הזרם באמפרמטר כעת?

(2) מהו מתח ההדקים כעת?

.4 במעגל שלפניכם נתונים סוללה, שלושה נגדים ושלושה מפסקים:



כשסוגרים את מפסק S_1 בלבד, מתח ההדקים הוא 15V. כשסוגרים גם את מפסק S_2, ורק מפסק S_3 נשאר פתוח, מתח ההדקים הוא 12V.

א. חשבו את כא"מ הסוללה ואת התנגדותה הפנימית.

ב. מהו המתח על מפסק S_3 הפתוח, כששני המפסקים האחרים סגורים?

ג. מהו מתח ההדקים כשכל המפסקים פתוחים?

ד. חשבו את הזרם בכל אחד משלושת הנגדים, כששלושת המפסקים סגורים.

ה. מדוע הסוללה מתחממת כשזורם בה זרם?

.5 פרוטונים נעים במאיץ חלקיקים קטן בתנועה מעגלית, בתוך שדה מגנטי אחיד. השדה המגנטי של כדור הארץ זניח.

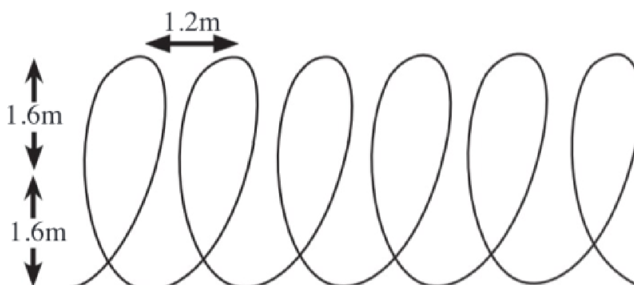
א. הביעו בעזרת m_p – מסת הפרוטון, e – מטען הפרוטון ו–B – השדה המגנטי, את זמן המחזור T של הפרוטונים.

נתון: זמן המחזור הוא: $T = 2 \cdot 10^{-6} s$.

ב. היעזרו בדף הנוסחאות, וחשבו את עוצמת השדה המגנטי של המאיץ.

במקרה נוסף הפרוטונים נכנסים באותה מהירות לאותו שדה, אך לא במאונך. הפרוטונים נעים בתנועה בורגית. רדיוס הבורג הוא 1.6 מטר, והפסיעה היא 1.2 מטר.

ראו בתרשים שלפניכם:

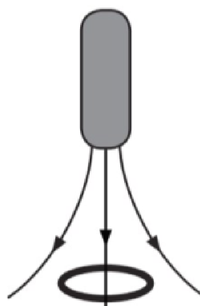


ג. חשבו את מהירות הפרוטונים ואת הזווית בין המהירות לשדה המגנטי.

ד. מחליפים את הפרוטונים בחלקיקי α בלי לשנות את המהירות ואת השדה. האם יחול שינוי ברדיוס הבורג? האם יחול שינוי בפסיעה? אם כן, מה השינוי ופי כמה? אם לא, הסבירו.

השראה אלקטרומגנטית

6. יוסף הצורף מנסה שיטה חדשה לחימום טבעות. לרשותו טבעת ניסויים מזהב טהור ומגנט חזק. הוא מציב את המגנט מעל הטבעת, ומזיז אותו ימינה ושמאלה במהירות, כך שבמשך חצי שנייה השטף המגנטי דרך הטבעת משתנה מערך של $2\cdot10^{-5}\,\text{Wb}$ לערך של $8\cdot10^{-5}\,\text{Wb}$ ובחצי השנייה הבאה, השטף משתנה חזרה לערך של $2\cdot10^{-5}\,\text{Wb}$. היתרון של שיטה זו הוא האפשרות לחמם את הטבעת בעודה על האצבע. ראו בתרשים שלפניכם:



א. לפי כיוון החצים שבתרשים, איזה קוטב של המגנט פונה למטה לכיוון הטבעת? הסבירו.

ב. חשבו את הכא״מ המושרה הממוצע הנוצר בטבעת במשך תנועה אחת של חצי שנייה.

ג. התנגדות הטבעת היא $R = 3 \cdot 10^{-4}\Omega$. העריכו את כמות החום הנוצרת בטבעת במשך חצי שנייה.

ד. חום סגולי של חומר מסוים הוא כמות האנרגיה הדרושה כדי להעלות את הטמפרטורה של קילוגרם אחד של החומר במעלת צלזיוס אחת. לכן כמות האנרגיה הדרושה כדי לחמם גוף בעל מסה m בהפרש טמפרטורות ΔT היא:

$$E = mc\Delta T$$

כאשר c הוא החום הסגולי.

החום הסגולי של זהב הוא $c = 130\frac{J}{°C \cdot Kg}$, ומסת הטבעת היא 3 גרמים. כמה זמן נדרש לחימום הטבעת ב–80 מעלות צלזיוס? הביעו את דעתכם על יעילות השיטה.

פתרונות מבחן 8

1. כדור מתכת הוא כדור מוליך. כל מטען הכדור מפוזר באופן אחיד על פניו. פנים הכדור אינו טעון.

א. הפוטנציאל של גוף כדורי הטעון באופן סימטרי, הוא כאילו היה כל מטען הכדור מרוכז במרכזו. לכן הנוסחה לפוטנציאל היא כמו הנוסחה של פוטנציאל במרחק R במטען נקודתי q:

$$V = \frac{kq}{R}$$
$$q = \frac{VR}{k} = \frac{1500 \cdot 0.12}{9 \cdot 10^9} = 2 \cdot 10^{-8}C$$

גודלו של מטען הכדור הוא $2 \cdot 10^{-8}C$, וסימנו חיובי כי הפוטנציאל שלו חיובי.

ב. פני הכדור טעונים במטען חיובי, שמשמעותו חוסר באלקטרונים. פנים הכדור אינו טעון. לכן צפיפות האלקטרונים גדולה יותר במרכז הכדור.

ג. כשמחברים את שני הכדורים בתיל מוליך, המטען החשמלי יכול לזרום מכדור לכדור, עד אשר הפוטנציאלים של שני הכדורים משתווים. לכן לאחר שהסתיימה הזרימה, המטענים של שני הכדורים, qA ו– qB מקיימים את הקשר:

$$\frac{kq_A}{R_A} = \frac{kq_B}{R_B}$$

כמו כן לפי חוק שימור המטען:

$$q_A + q_B = q = 2 \cdot 10^{-8}C$$

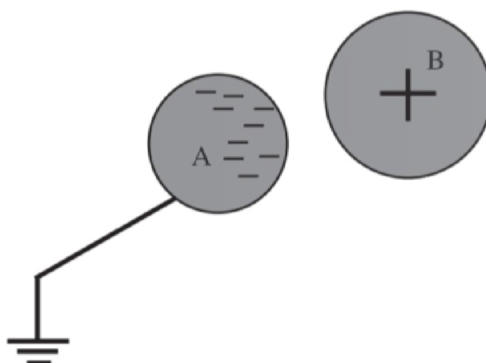
פתרון מערכת המשוואות הוא:

$$q_A = 0.8 \cdot 10^{-8}C$$
$$q_B = 1.2 \cdot 10^{-8}C$$

לפני החיבור, לא היה כדור B טעון, לכן כמות המטען שעברה בתיל שווה למטען של כדור B לאחר החיבור היא $1.2 \cdot 10^{-8}C$.

ד. המטען שזרם מכדור A לכדור B הוא מטען חיובי. למעשה זרמו אלקטרונים, שמטענם שלילי, מכדור B לכדור A.

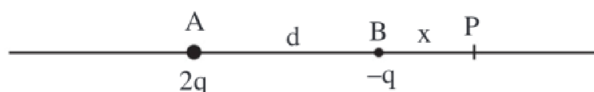
ה. כדור B טעון במטען חיובי. כשמקרבים אותו לכדור A, כדור A נטען שלילית. אלקטרונים חופשיים נמשכים אל כדור B החיובי, ועוברים מכדור הארץ אל כדור A. ראו בתרשים שלפניכם:



2. א. קווי השדה החשמלי יוצאים ממטען חיובי ומסתיימים במטען שלילי. לכן A חיובי ו-B שלילי.

ב. מספר קווי השדה היוצאים או המסתיימים מייצג את גודל המטען, לכן המטען ב-A כפול בגודלו מהמטען ב-B.

ג. נסמן: $q_B = -q \quad ; \quad q_A = 2q$, ונשרטט את המערכת. כדי שהשדה בנקודה P יתאפס, השדות שיוצרים המטענים $\vec{E}_A$ ו $\vec{E}_B$ צריכים להיות שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. דבר זה אפשרי רק על הישר AB, מימין ל-B, כי המטען ב-B קטן יותר. לכן הנקודה חייבת להיות קרובה יותר אליו. נמצא את המרחק x:



$$\left|\vec{E}_A\right| = \left|\vec{E}_B\right|$$

$$\frac{k \cdot 2q}{(d+x)^2} = \frac{kq}{x^2}$$

$$2x^2 = (d+x)^2$$

$$\pm x\sqrt{2} = d + x$$

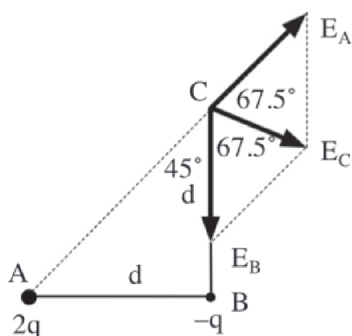
$$\left(-1 \pm \sqrt{2}\right)x = d$$

$$x = \frac{d}{\left(-1 \pm \sqrt{2}\right)}$$

נבחר בפתרון החיובי, כי הפתרון השלילי הוא בין המטענים, לכן אינו אפשרי:

$$x = \frac{d}{\left(-1+\sqrt{2}\right)} = 2.41d$$

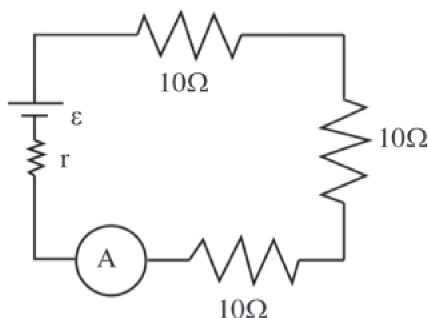
ד. נראה שהשדות שיוצרים שני המטענים בנקודה C שווים בגודלם:



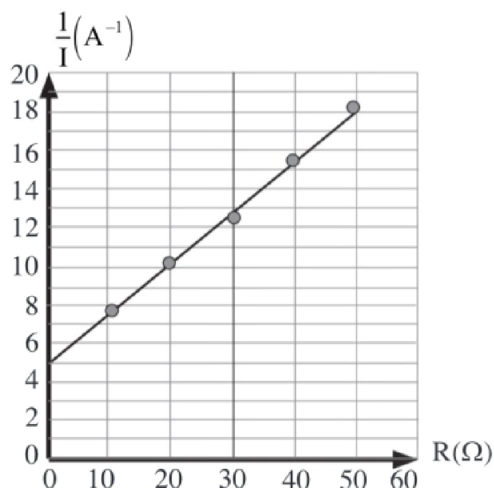
$$E_A = \frac{k\cdot 2q}{AC^2} = \frac{k\cdot 2q}{\left(d\sqrt{2}\right)^2} = \frac{kq}{d^2} = E_B$$

נחבר את הווקטורים של השדות בשיטת המקבילית, ונקבל מעוין. כיוון השדה עם כיוון אלכסון המעוין כמתואר בתרשים.

3. א. נשרטט את המעגל, ולא נשכח את האמפרמטר:



ב. נשלים את הטבלה, ונשרטט את הגרף:



ג. נבטא את $\frac{1}{I}$ כפונקציה של R:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

$$\frac{1}{I} = \frac{R + r}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot R + \frac{r}{\varepsilon}$$

קיבלנו משוואה של קו ישר – $y = ax + b$ ששיפועו $a = \frac{1}{\varepsilon}$ ונקודת החיתוך שלו היא $\frac{r}{\varepsilon}$.

נמצא את הכא"מ ε לפי השיפוע. נבחר בשתי נקודות:

$$(0,5)\,;\,(50,18)$$

$$m = \frac{18 - 5}{50 - 0} = 0.26 \frac{1}{A \cdot \Omega}$$

$$\frac{1}{\varepsilon} = 0.26$$

$$\varepsilon = \frac{1}{0.26} = 3.85V$$

נחשב את ההתנגדות הפנימית r:

$$b = \frac{r}{\varepsilon}$$
$$5 = \frac{r}{\varepsilon}$$
$$r = \varepsilon \cdot b = 3.85 \cdot 5 = 19.2\Omega$$

כא"מ המקור הוא 3.85 וולט, וההתנגדות הפנימית היא 19.2 אוהם.

ד. נועם יצרה למעשה קצר.

(1) הזרם באמפרמטר במצב זה הוא זרם הקצר $I = \frac{\varepsilon}{r} = 0.2A$.

(2) מתח ההדקים במצב של קצר, ללא נגד חיצוני, הוא 0.

4. א. נמצא את הזרם דרך הסוללה בשני המצבים:

- כשסוגרים את מפסק S_1 בלבד:

$$I_t = \frac{V}{R_t} = \frac{V}{R_1} = \frac{15}{15} = 1A$$

- כשסוגרים גם את מפסק S_2:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{15} + \frac{1}{10}$$
$$R_t = 6\Omega$$
$$I_t = \frac{V}{R_t} = \frac{12}{6} = 2A$$

נציב בנוסחת מתח ההדקים ונפתור את מערכת משוואות:

$$V = \varepsilon - I_t r$$
$$\begin{cases} 15 = \varepsilon - 1 \cdot r \\ 12 = \varepsilon - 2r \end{cases}$$
$$r = 3\Omega$$
$$\varepsilon = 18V$$

כא״מ הסוללה הוא 18 וולט, והתנגדותה הפנימית היא 3 אוהם.

ב. המתח על מפסק S_3 הוא 12 וולט. הסבר: המתח על הנגד R_3 הוא 0 כי לא זורם בו זרם, לכן המתח על מפסק S_3 שווה למתח ההדקים.

ג. מתח ההדקים הוא 18 וולט. הסבר: כשכל המפסקים פתוחים הזרם דרך המקור הוא 0, ומתח ההדקים מתלכד עם הכא״מ.

ד. נמצא את ההתנגדות השקולה, את הזרם במקור ואת מתח ההדקים, כשכל המפסקים סגורים:

$$\frac{1}{R_t(ex)} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{15} + \frac{1}{10} + \frac{1}{30} = \frac{1}{5}$$
$$R_t(ex) = 5\Omega$$
$$R_t = r + R_t(ex) = 3 + 5 = 8\Omega$$

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{18}{8} = 2.25A$$
$$V = \varepsilon - I_t r = 18 - 2.25 \cdot 3 = 11.25V$$

נחשב את שלושת הזרמים:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{11.25}{15} = 0.75A$$
$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{11.25}{10} = 1.125A$$
$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{11.25}{30} = 0.375A$$

ה. מקור החום של הסוללה הוא ההספק המתפתח בנגד הפנימי.

5. א. הכוח הפועל על הפרוטון הוא כוח לורנץ – $F = qv_{\perp}B$. נתון שהמהירות מאונכת לשדה המגנטי. נביע תחילה את רדיוס המסלול – R:

$$\Sigma F = ma$$
$$evB = ma = m\frac{v^2}{R}$$
$$R = \frac{m_p v}{eB}$$

נביע את זמן המחזור – T:

$$v = \omega R = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{mv}{eB}$$
$$T = \frac{2\pi m_p}{eB}$$

ב. עוצמת השדה המגנטי של המאיץ:

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} Kg$$
$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$
$$B = \frac{2\pi m_p}{eT} = \frac{2\pi \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 0.0328T$$

ג. בתנועה בורגית, רדיוס המעגל תלוי ברכיב המהירות הניצב לשדה המגנטי – . לכן נציב בביטוי שקיבלנו בסעיף א׳ את $v_\perp$:

$$R = \frac{mv_\perp}{eB}$$

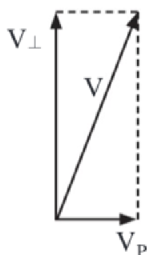
$$v_\perp = \frac{R\cdot eB}{m_p} = \frac{1.6\cdot 1.6\cdot 10^{-19}\cdot 0.0328}{1.67\cdot 10^{-27}} = 5.03\cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}$$

חישבנו את רכיב המהירות הניצב לשדה המגנטי. נחשב כעת את הרכיב המקביל $v_\parallel$ לפי הפסיעה P:

$$P = v_\parallel T$$

$$v_\parallel = \frac{P}{T} = \frac{1.2}{2\cdot 10^{-6}} = 0.6\cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}$$

נבנה את וקטור המהירות:



$$\left|\vec{v}\right| = \sqrt{V_\parallel^{\,2} + V_\perp^{\,2}} = \sqrt{0.6^2 + 5.03^2}\cdot 10^{6} = 5.07\cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}$$

$$\tan\alpha = \frac{V_\perp}{V_\parallel} = \frac{5.03\cdot 10^{6}}{0.6\cdot 10^{6}} = 8.38$$

$$\alpha = 83.2^\circ$$

מהירות הפרוטונים היא $5.07\cdot 10^{6}\,\frac{m}{s}$, בזווית של 83.20 לכיוון השדה המגנטי.

ד. מסת חלקיק α גדולה פי 4 ממסת הפרוטון, ומטען החלקיק כפול ממטען הפרוטון, כלומר:

$$m_\alpha = 4m_p$$

$$q_\alpha = 2e$$

נציב בביטויים המתאימים:

$$R_{\alpha} = \frac{4m_{p}v_{\perp}}{2eB} = 2R_{p}$$
$$T_{\alpha} = \frac{2\pi \cdot 4m_{p}}{2eB} = 2T_{p}$$
$$P_{\alpha} = v_{\parallel}T_{\alpha} = 2P_{p}$$

רדיוס הבורג והפסיעה יגדלו פי 2.

6. א. השדה המגנטי מחוץ למגנט יוצא מהקוטב הצפוני ונכנס אל הדרומי. לפי כיוון החצים, הקוטב הצפוני פונה למטה, אל הטבעת.

ב. מאחר שקצב השינוי בשטף המגנטי הוא קבוע, הרי לפי חוק פאראדיי:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{2\cdot 10^{-5} - 8\cdot 10^{-5}}{0.5} = 1.2\cdot 10^{-4}\,V$$

הכא״מ הממוצע הוא $1.2\cdot 10^{-4}\,V$.

ג. נחשב את כמות החום, ΔQ. נניח בקרוב שהכא״מ במשך מחצית השנייה הוא קבוע ושווה לכא״מ הממוצע:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = I\varepsilon = \frac{\varepsilon}{R}\cdot\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R}$$
$$\Delta Q = \frac{\varepsilon^2}{R}\cdot\Delta t = \frac{\left(1.2\cdot 10^{-4}\right)^2}{3\cdot 10^{-4}}\cdot 0.5 = 2.4\cdot 10^{-5}\,J$$

ד. לפי הסעיף הקודם, כמות החום בשנייה אחת היא $2\Delta Q = 4.8\cdot 10^{-5}\,J$.

נחשב לפי הנוסחה הנתונה את כמות החום הכוללת הדרושה:

$$E = mc\Delta T = 0.003\cdot 130\cdot 80 = 31.2J$$

הזמן הכולל בשניות הוא היחס בין כמות החום הכוללת לכמות החום הנוצרת בטבעת בשנייה אחת:

$$t = \frac{31.2}{4.8 \cdot 10^{-5}} = 650{,}000\,\text{sec}$$

הזמן הנדרש הוא 650,000 שניות שהן יותר משבוע. יוסף הצורך יצטרך למצוא שיטה יעילה יותר.

מבחן 9

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. הפוטנציאל החשמלי לאורך ציר ה־x נתון לפי הנוסחה $V(x) = 50,000 - 2,000x$, כאשר הפוטנציאל נמדד בוולטים ושיעור ה־x במטרים.

א. הסבירו מדוע השדה החשמלי קבוע לאורך ציר ה־x.

ב. האם כיוון השדה החשמלי הוא עם הכיוון החיובי של ציר ה־x או נגדו?

ג. חשבו את גודלו של השדה החשמלי לאורך ציר ה־x.

ד. פרוטון משוחרר מהנקודה $x = 100m$. מה תהיה מהירותו לאחר שיעבור מרחק של שני מטרים?

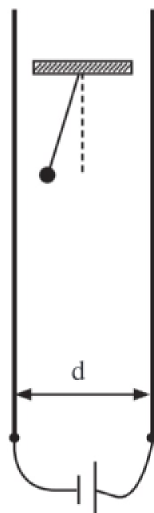
ה. אלקטרון משוחרר מאותה הנקודה, ועובר גם הוא מרחק של שני מטרים.

(1) האם עבודת הכוח החשמלי על האלקטרון שווה לעבודת הכוח החשמלי על הפרוטון?

(2) האם מהירות האלקטרון לאחר שעבר מרחק של שני מטרים שווה בגודלה למהירות הפרוטון?

(3) האם מהירות האלקטרון לאחר שעבר מרחק של שני מטרים שווה בכיוונה למהירות הפרוטון?

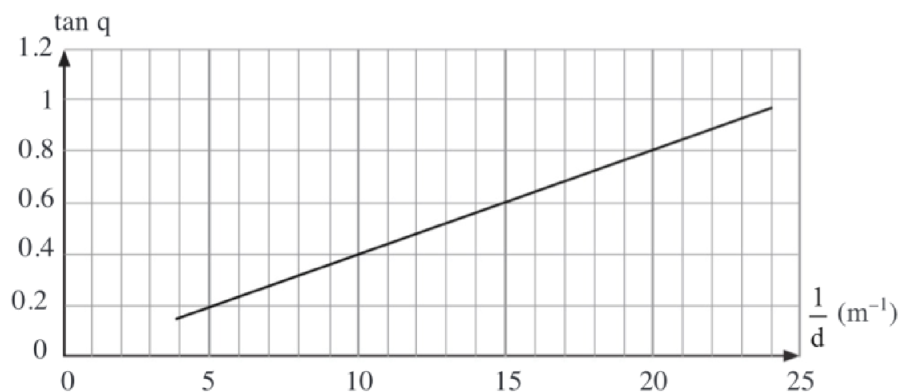
2. כדור קטן תלוי על חוט חסר משקל, בין שני לוחות טעונים בצפיפות מטען אחידה. הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות הוא V, והמרחק d ביניהם ניתן לשינוי. מסת הכדור m, ומטענו q. הכדור סוטה בזווית q שמאלה מהאנך. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מה סימן המטען של הכדור?

ב. הביעו את tan q בעזרתם של הנתונים לעיל ותאוצת הנפילה החופשית g.

לפניכם גרף של tan q כפונקציה של $\frac{1}{d}$:

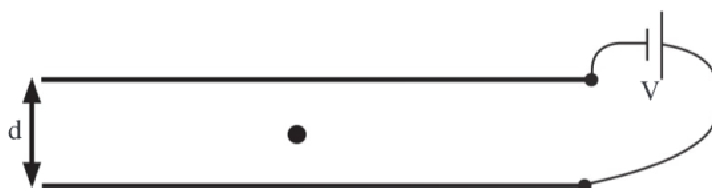


נתון:

$$V = 2000V$$
$$m = 2gr$$

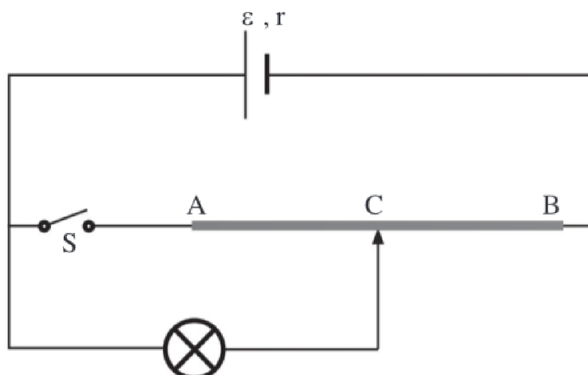
ג. חשבו בעזרת שיפוע הגרף את מטען הכדור.

ד. מטים את הלוחות כך שיהיו אופקיים. ראו בתרשים שלפניכם:



מה צריך להיות המרחק בין הלוחות, כדי שהכדור ירחף בין הלוחות (ללא החוט)?

.3 נורה מחוברת למקור מתח בעל התנגדות פנימית לא זניחה, נגד משתנה AB בעל מגע נייד C ומפסק S.



א. מה צריך להיות מצבו של המפסק (פתוח או סגור), והיכן יש למקם את המגע הנייד כדי שהזרם דרך הנורה יתאפס? הסבירו.

ב. במצב המתואר בתרשים, באיזה מצב יהיה מתח ההדקים של המקור גדול יותר, כאשר המפסק פתוח או סגור?

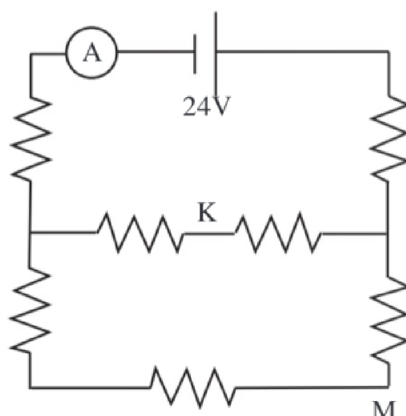
ג. במצב המתואר בתרשים, באיזה מצב תאיר הנורה באור חזק יותר, כאשר המפסק פתוח או סגור (הניחו שבשני המצבים הנורה אינה נשרפת)?

נתונים להמשך השאלה: מתח ההפעלה של הנורה הוא 6V, כא"מ המקור הוא $\varepsilon = 21V$, והתנגדותו הפנימית היא $r = 5\Omega$. אורך הנגד המשתנה $AB = 30Cm$, והתנגדותו במלוא אורכו היא $R_{AB} = 50\Omega$.

ד. כדי להפעיל את הנורה במתח ההפעלה (6V) כאשר המפסק סגור, יש למקם את המגע הנייד C במרחק של 18 cm מהקצה A. מצאו את הזרם הזורם בנורה.

ה. היכן יש למקם את המגע הנייד, כדי שהנורה תפעל במתח ההפעלה כאשר המפסק פתוח?

4. במעגל שלפניכם מחוברים 7 נגדים זהים, שהתנגדות כל אחד מהם R, ואמפרמטר שהתנגדותו ניתנת להזנחה, למקור מתח שהכא"מ שלו 24V, והתנגדותו הפנימית זניחה.



א. הביעו באמצעות R את ההתנגדות השקולה של המעגל.

האמפרמטר מראה 1.5A.

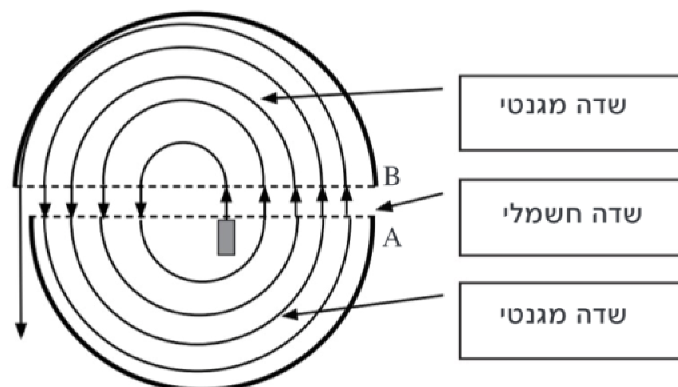
ב. חשבו את R.

ג. מצאו את הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות M ו–K הנראות במעגל. איזו נקודה נמצאת בפוטנציאל גבוה יותר?

ד. העתיקו את המעגל למחברותיכם, והוסיפו לו מכשיר מדידה מתאים היכול להראות את התוצאה שקיבלתם בסעיף הקודם. ציינו מה צריכה להיות התנגדות המכשיר.

5. הציקלוטרון הוא מתקן להאצת חלקיקים. הוא בנוי משני חצאי עיגול, שבתוכם החלקיקים נעים בתנועה מעגלית בהשפעת שדה מגנטי אחיד. בין חצאי העיגול קיים אזור שבו יש שדה חשמלי מתחלף. החלקיקים (בדרך כלל פרוטונים, דיוטרונים או חלקיקי אלפא) נכנסים לשדה החשמלי, ומואצים בקו ישר. בשני חצאי העיגול קיים שדה מגנטי חזק, הגורם לחלקיקים לנוע בחצי מעגל, ולהחזיר אותם לשדה החשמלי. בינתיים כיוון השדה החשמלי מתחלף בתיאום זמנים מדויק, והחלקיקים מואצים שוב, הפעם בכיוון ההפוך, ועוברים לחצי העיגול האחר. בכל פעם שהחלקיקים עוברים את השדה החשמלי, הם מקבלים את אותה מנת אנרגיה. לכן מהירותם גדלה, וגם רדיוס

הסיבוב גדל. בסוף תהליך ההאצה החלקיקים מגיעים לרדיוס המרבי ולמהירות המרבית, ויוצאים מהמתקן.

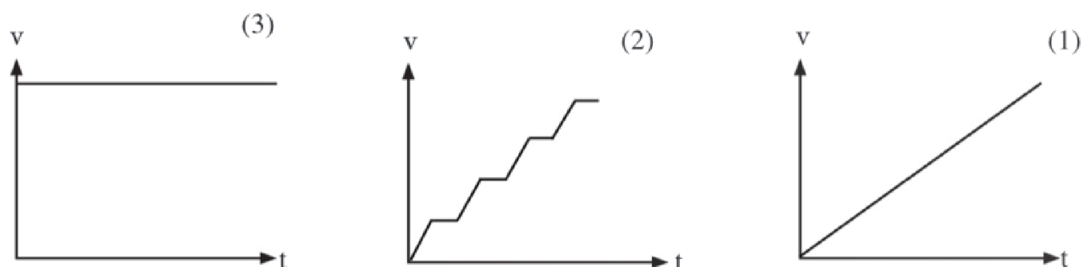


ציקלוטרון בעל רדיוס של 50Cm מאיץ פרוטונים. עוצמת השדה המגנטי בתוך הציקלוטרון היא

0.5 טסלה, והפרש הפוטנציאלים בין שני התאים הוא 200V.

א. עקרון הפעולה של הציקלוטרון מבוסס על העובדה שתדירות ההחלפה של השדה החשמלי קבועה, ואינה תלויה ברדיוס המסלול (בהנחה שהמרווח בין שני חצאי העיגול קטן מאוד, וזמן מעבר החלקיקים בו זניח ביחס לזמן המחזור). הוכיחו עובדה זו.

ב. איזה גרף משלושת הגרפים הבאים יכול לתאר את גודל המהירות של הפרוטונים בציקלוטרון, כפונקציה של הזמן? נמקו.



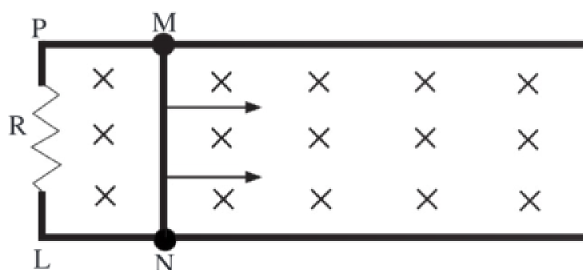
ג. חשבו את תדירות ההחלפה של השדה החשמלי.

ד. מהי האנרגיה הקינטית של הפרוטונים בצאתם מהציקלוטרון?

ה. כמה סיבובים משלים הפרוטון במהלך תנועתו בתוך המכשיר?

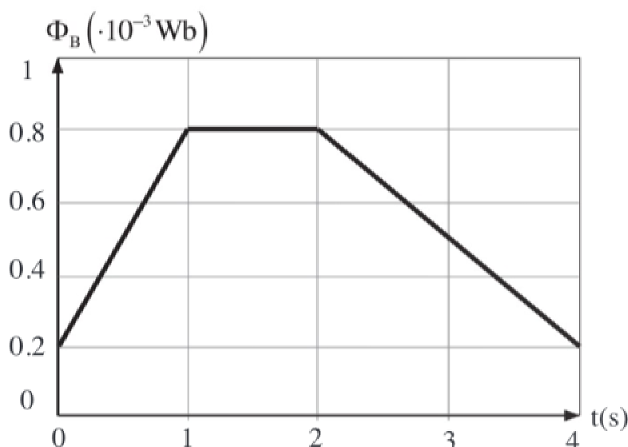
השראה אלקטרומגנטית

6. מוט מוליך MN שאורכו 0.6 מטר חופשי לנוע על שתי מסילות מוליכות, שביניהן נגד $R = 0.3\Omega$ כך שנוצר בכל רגע מעגל סגור MNLP. המערכת נמצאת בתוך שדה מגנטי, שעוצמתו $B = 2\cdot 10^{-4}\text{T}$ וכיוונו לתוך הדף. הזניחו את השדה המגנטי של כדור הארץ. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מה כיוון הזרם הנוצר בנגד R כשהמוט נע ימינה?

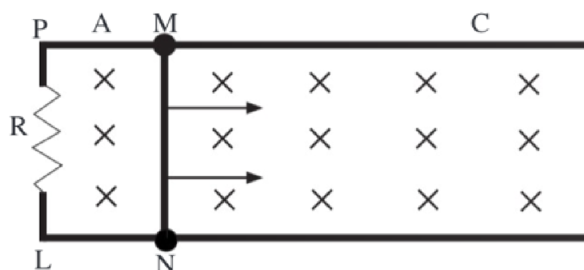
לפניכם גרף של השטף המגנטי דרך המעגל סגור MNLP כפונקציה של הזמן:



ב. שרטטו גרף של מהירות המוט כפונקציה של הזמן, כאשר הכיוון החיובי הוא ימינה.

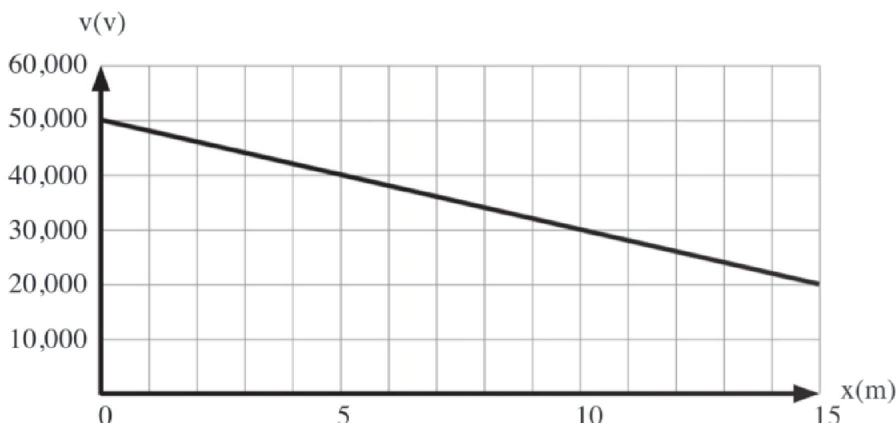
ג. שרטטו גרף של הזרם בנגד כפונקציה של הזמן, כאשר הכיוון החיובי הוא מ-P ל-L.

ד. במקרה נוסף המוט נע מ-A ל-C במהירות קבועה. הראו שהמטען הכולל העובר בנגד במהלך התנועה מ-A ל-C, לא תלוי במהירות.



פתרונות מבחן 9

1. א. גודלו של השדה החשמלי הוא שינוי פוטנציאל ליחידת אורך: $|E| = \frac{\Delta V}{\Delta x}$. הנוסחה שנתונה היא נוסחה של קו ישר. נשרטט את הישר:



השדה הוא השיפוע של הישר, לכן הוא קבוע.

ב. כיוון השדה החשמלי הוא במורד הפוטנציאל (מהפוטנציאל הגבוה לנמוך), כלומר עם הכיוון החיובי של ציר x.

ג. לפי הנוסחה הנתונה, השיפוע של הישר הוא $a = -2{,}000\frac{V}{m}$. גודל השדה החשמלי שווה לערכו המוחלט של השיפוע, כלומר $|E| = 2{,}000\frac{V}{m}$.

ד. נחשב את המהירות לפי משפט עבודה אנרגיה (נשים לב: אנרגיה קינטית – E_k, שדה חשמלי – $\vec{E}$):

$$w = \Delta E_k$$

$$F \cdot \Delta x = \Delta E_k$$

$$q_p \cdot |\vec{E}| \cdot \Delta x = \frac{1}{2}mv^2$$

$$1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}000 \cdot 2 = \frac{1}{2} \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} v^2$$

$$v = 8.78 \cdot 10^5 \ \frac{m}{s}$$

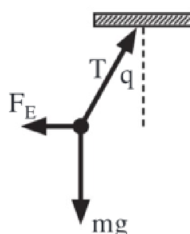
ה. (1) עבודת הכוח החשמלי על האלקטרון שווה לעבודת הכוח החשמלי על הפרוטון. הסבר: מטען האלקטרון שווה בערכו המוחלט למטען הפרוטון, לכן פעלו על שניהם כוחות שווים לאורך דרכים שוות.

(2) מהירות האלקטרון שונה בגודלה ממהירות הפרוטון, כי מסותיהם שונות.

(3) כיוון המהירות שונה גם הוא, כי כיוון הכוח החשמלי שפועל על האלקטרון השלילי מנוגד לכיוון הכוח שפועל על הפרוטון החיובי.

2. א. לפי נטיית החוט, הכדור נמשך ללוח השלילי ונדחה מהלוח החיובי, לכן מטען הכדור הוא חיובי.

ב. נשרטט את הכוחות הפועלים על הכדור:



נביא את הכוח החשמלי – F_E:

$$F_E = qE = q\frac{V}{d}$$

הכדור במנוחה לכן:

$$\Sigma F = 0$$

$$\begin{cases} T\sin\theta = F_E \\ \div \\ T\cos\theta = mg \end{cases}$$

$$\tan\theta = \frac{F_E}{mg} = q\frac{V}{dmg}$$

$$\tan\theta = \frac{qV}{mg}\cdot\frac{1}{d}$$

ג. לפי הביטוי שקיבלנו, שיפוע הגרף הוא:

$$a = \frac{qV}{mg}$$

נחשב את שיפוע הגרף הנתון לפי שתי נקודות: $(0.2\ ,5)$, $(1\ ,25)$:

$$a = \frac{1-0.2}{25-5} = \frac{0.8}{20m^{-1}} = 0.04m$$

נציב ונקבל את מטען הכדור:

$$a = \frac{qV}{mg}$$
$$0.04 = \frac{q \cdot 2000}{0.002 \cdot 10}$$
$$q = 4 \cdot 10^{-7}C$$

ד. כדי שהכדור ירחף, הכוח החשמלי צריך להיות שווה למשקלו, כלומר:

$$mg = F_E$$

מצב זה מיוצג בגרף כאשר:

$$\tan\theta = 1$$

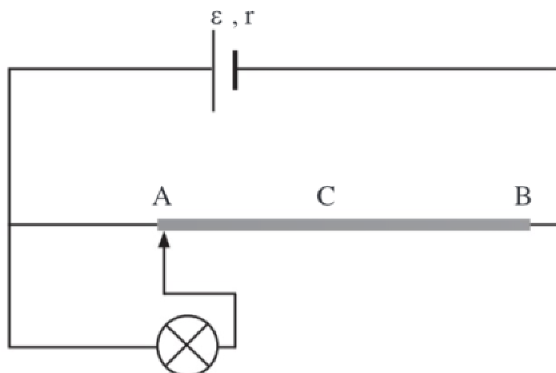
הנקודה המתאימה בגרף היא: $(1\ ,25)$

כלומר:

$$\frac{1}{d} = 25$$
$$d = 0.04m$$

המרחק בין הלוחות צריך להיות 0.04 מטר.

3. א. צריך לסגור את המפסק, למקם את המגע הנייד ב-A, וכך ייווצר קצר בין הדקי הנורה, המתח עליה יתאפס, ועמו יתאפס הזרם. ראו בתרשים שלפניכם:



ב. מתח ההדקים גדול יותר כאשר המפסק פתוח. הסבר: סגירה של המפסק מקטינה את ההתנגדות השקולה של המעגל, לכן הזרם דרך המקור גדל. הגדלת הזרם מקטינה את מתח ההדקים לפי הנוסחה $V_{AB} = \varepsilon - Ir$.

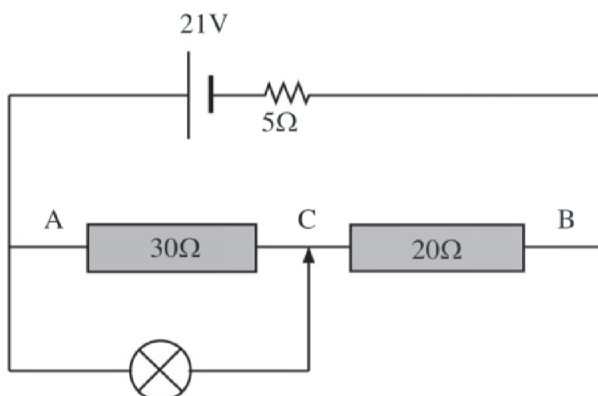
ג. נמצא באיזה מצב המתח על הנורה $V_{\otimes}$ גדול יותר. סכום המתחים בטור שווה לכא"מ המקור:

$$\varepsilon = V_{\otimes} + I_t R_{AC} + I_t r$$
$$V_{\otimes} = \varepsilon - I_t R_{AC} - I_t r$$

כשהמפסק סגור I_t גדול יותר, לכן V קטן יותר. הנורה תאיר חזק יותר כשהמפסק פתוח.

ד. התנגדות הנגד המשתנה ליחידת אורך היא $\lambda = \frac{50}{30}\frac{\Omega}{cm}$. ההתנגדות של הקטע AC היא $R_{AC} = \frac{50}{30} \cdot 18 = 30\Omega$, וההתנגדות של הקטע CB היא $R_{CB} = \frac{50}{30} \cdot 12 = 20\Omega$.

נשרטט את המעגל המתקבל:



נמצא את הזרם בנגד AC:

$$V_{AC} = V_{\otimes} = 6V$$

$$I_{AC} = \frac{V_{AC}}{R_{AC}} = \frac{6}{30} = 0.2A$$

נמצא את הזרם בענף הראשי, I_t:

$$\varepsilon = V_{AC} + V_{CB} + V_r$$

$$\varepsilon = V_{\otimes} + I_t R_{BC} + I_t r$$

$$21 = 6 + 20I_t + 5I_t$$

$$15 = 25I_t$$

$$I_t = 0.6A$$

לפי חוק הצומת:

$$I_{\otimes} = I_t - I_{AC} = 0.6 - 0.2 = 0.4A$$

ה. נמצא את התנגדות הנורה:

$$R_{\otimes} = \frac{V_{\otimes}}{I_{\otimes}} = \frac{6}{0.4} = 15\Omega$$

נחשב את התנגדות הקטע CB $\left(I_t = I_{\otimes} = 0.4A\right)$:

$$\frac{\varepsilon}{I_t} = R_t = R_{\otimes} + R_{CB} + r$$

$$\frac{21}{0.4} = 15 + R_{CB} + 5$$

$$R_{CB} = 32.5\Omega$$

נמצא את אורך הקטע CB:

$$\frac{50}{30} \cdot CB = 32.5$$

$$CB = 19.5cm$$

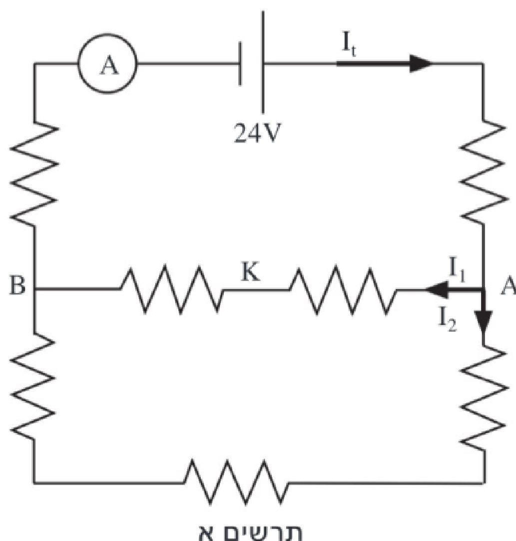
יש למקם את המגע הנייד 19.5 סנטימטרים מ-B.

4. א. ראשית נקבע את הזרמים במעגל. הזרם בענף הראשי I_t מתפצל לשני זרמים בענפים, מקבילים I_1 ו-I_2. נסמן את התנגדות שני הענפים המקבילים ב-R_1 וב-R_2 בהתאמה. ראו תרשים א.

$R_1 = 2R$

$R_2 = 3R$

נביע באמצעות R את ההתנגדות השקולה בין A ל-B:



תרשים א

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{3R} = \frac{5}{6R}$$

$$R_{AB} = 1.2R$$

קיבלנו שלושה נגדים בטור, ראו תרשים ב. לכן ההתנגדות השקולה של המעגל היא:

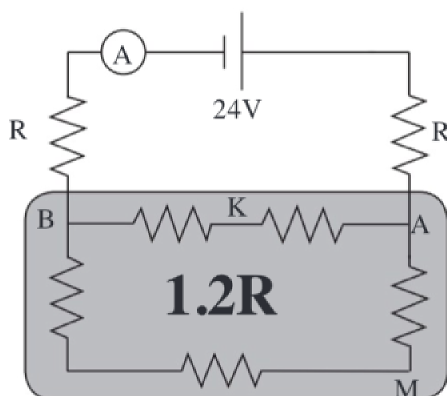
$$R_t = R + 1.2R + R = 3.2R$$

ב. נמצא את R:

$$R_t = \frac{V}{I_t}$$

$$3.2R = \frac{24}{1.5}$$

$$R = 5\Omega$$



תרשים ב

ג. נחשב את I_1 ואת I_2:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_t \\ V_{AB} = I_1R_1 = I_2R_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = 1.5 \\ I_1 \cdot 2R = I_2 \cdot 3R \end{cases}$$

$$I_1 = 0.9A$$

$$I_2 = 0.6A$$

נחשב את המתחים V_{AK} ו- V_{AM}:

$$V_{AK} = I_1R = 0.9 \cdot 5 = 4.5V$$

$$V_{AM} = I_2R = 0.6 \cdot 5 = 3V$$

הפוטנציאל ב-K נמוך ב-4.5V מהפוטנציאל ב-A, והפוטנציאל ב-M נמוך ב-3V מהפוטנציאל ב-A. לכן הפוטנציאל ב-M גבוה ב-1.5V מהפוטנציאל ב-K. נראה זאת גם בחישוב הבא:

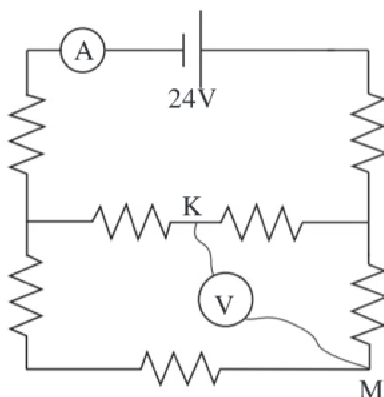
$$V_A - V_K = 4.5V$$

$$-$$

$$V_A - V_M = 3V$$

$$V_M - V_K = 4.5V - 3V = 1.5V$$

ד. יש לחבר בין M ל-K וולטמטר שהתנגדותו גדולה מאוד. ראו תרשים ג.



תרשים ג

5. א. נפתח ביטוי לתדירות לפי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F = ma$$

$$qvB = m\frac{v^2}{R}$$

$$qB = \frac{mv}{R} = \frac{m\omega R}{R} = m\omega$$

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

$$2\pi f = \frac{qB}{m}$$

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

קיבלנו ביטוי שאינו תלוי ברדיוס המסלול המעגלי, אלא רק בשדה המגנטי וביחס $\frac{q}{m}$.

ב. הגרף הנכון הוא (2). הסבר: במשך התנועה בשדה המגנטי, המהירות קבועה בגודלה ובמשך התנועה בשדה החשמלי, החלקיק נע בתאוצה קבועה.

ג. נחשב את התדירות:

$$f = \frac{q_p B}{2\pi m_p} = \frac{1.6\cdot 10^{-19}\cdot 0.5}{2\pi\cdot 1.67\cdot 10^{-27}} = 7.62\cdot 10^{6}\,\text{Hz}$$

תדירות ההחלפה של השדה החשמלי היא 7.62 מגהרץ.

ד. נחשב את המהירות:

$$v = \omega R = 2\pi f\cdot R = 2\pi\cdot 7.62\cdot 10^{6}\cdot 0.5 = 2.39\cdot 10^{7}\,\frac{m}{s}$$

נציב בנוסחת האנרגיה הקינטית:

$$E_k = \frac{1}{2}m_p v^2 = \frac{1}{2}\cdot 1.67\cdot 10^{-27}\cdot\left(2.39\cdot 10^{7}\right)^2 = 4.77\cdot 10^{-13}\,\text{J}$$

ה. בכל פעם שהפרוטון עובר בשדה החשמלי, הוא מקבל אנרגיה של:

$$\Delta E = w_{AB} = q_p V_{AB}$$
$$\Delta E = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 200 = 3.2 \cdot 10^{-17} J$$

מספר המעברים הוא היחס בין האנרגיה הקינטית הסופית לבין האנרגיה בכל מעבר:

$$n = \frac{E_k}{\Delta E} = \frac{4.77 \cdot 10^{-13}}{3.2 \cdot 10^{-17}} = 14{,}900$$

בכל סיבוב, הפרוטון מבצע שני מעברים כאלה, לכן מספר הסיבובים הוא 7,450.

6. א. כיוון הזרם בנגד הוא מ-P ל-L. נציג שלושה נימוקים (מספיק לציין נימוק אחד):

נימוק ראשון: לפי חוק לנץ, השטף דרך המעגל הסגור LPMN גדל, לכן ייווצר זרם מושרה שייצור שדה מושרה, שכיוונו הפוך לשדה המקורי, כלומר החוצה מהדף. לפי כלל יד ימין, כיוון הזרם הוא מ-P ל-L.

נימוק שני: המוט נע ימינה, וכיוון השדה המגנטי הוא לתוך הדף. לכן כוח לורנץ הפועל על מטען חיובי בתוך המוט הוא למעלה, לפי כלל יד ימין, כלומר כיוון הזרם הוא מ-P ל-L.

נימוק שלישי: כיוון הכוח המגנטי הפועל על המוט חייב להיות שמאלה, שאם לא כן, נקבל אנרגיה יש מאין (זהו היבט נוסף של חוק לנץ). לכן לפי כלל יד ימין, כיוון הזרם הוא מ-P ל-L.

ב. נביע את השטף המגנטי על ידי המהירות. נסמן את אורך המוט ב-L ואת מרחקו מהנגד ב-x:

$$\Phi_B = B \cdot A = B \cdot L \cdot x = B \cdot L\left(x_0 + vt\right) = BLx_0 + BLvt$$

מכאן ששיפוע הגרף m, הוא: $m = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = vBL$.

(1) בפרק הזמן $0 < t < 1s$

המהירות היא 5 מטרים בשנייה.

(2) בפרק הזמן $1s < t < 2s$ השיפוע הוא 0, והמהירות גם היא 0.

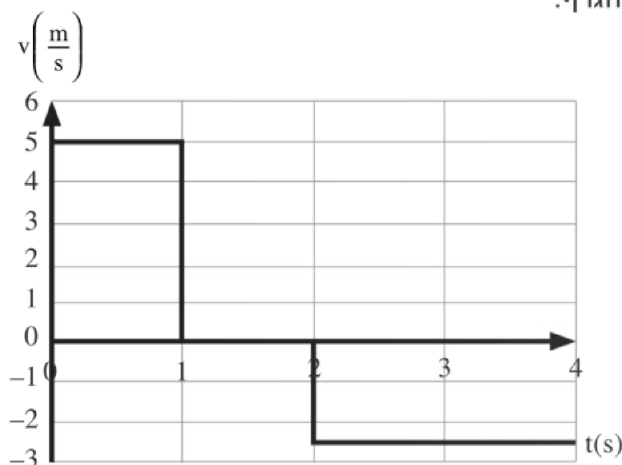
(3) בפרק הזמן $2s < t < 4s$

$$m = \frac{0.2 \cdot 10^{-3} - 0.8 \cdot 10^{-3}}{4-2} = -0.3 \cdot 10^{-3}$$

$$v = \frac{m}{BL} = \frac{-0.3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 0.6} = -2.5 \frac{m}{s}$$

המהירות היא 2.5 מטרים בשנייה שמאלה.

נשרטט את הגרף:



ג. נביע את הזרם לפי המהירות:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBL}{R} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 0.6}{0.3} v = 4 \cdot 10^{-4} v$$

הזרם ביחס ישר למהירות ולפי סעיף א׳, הכיוון החיובי מתאים לכיוון החיובי של המהירות,

לכן:

(1) בפרק הזמן $0 < t < 1s$

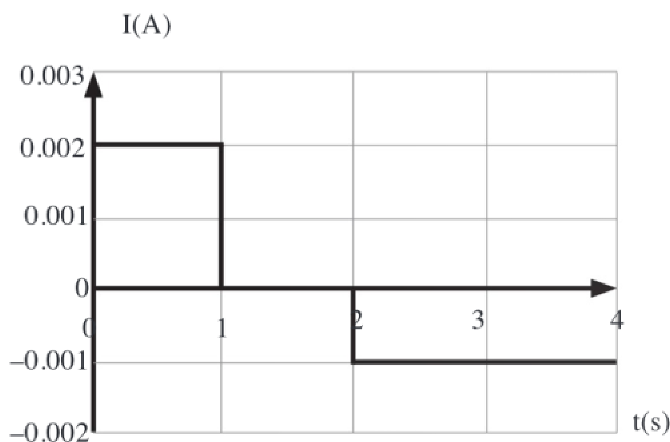
$$I = 4 \cdot 10^{-4} v = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = 0.002A$$

(2) בפרק הזמן $1s < t < 2s$ הזרם הוא 0.

(3) בפרק הזמן $2s < t < 4s$

$$I = 4 \cdot 10^{-4} v = 4 \cdot 10^{-4} \cdot (-2.5) = -0.001A$$

נשרטט את הגרף:



ד. נביע את המטען העובר בנגד לפי ההעתק מ-A ל-C – $\Delta x = v\Delta t$:

$$\Delta q = I\Delta t = \frac{vBL}{R} \cdot \Delta t = \frac{BL}{R} \cdot v\Delta t = \frac{BL\Delta x}{R}$$

הראינו שהמטען העובר בנגד לא תלוי במהירות אלא בהעתק.

מבחן 10

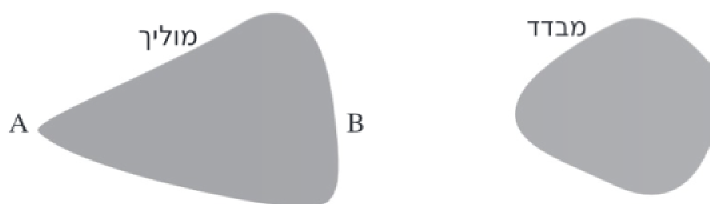
ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. א. קבעו לכל אחד מההיגדים הבאים אם הוא נכון או לא נכון:

(1) בגוף מוליך טעון במטען חיובי אין אלקטרונים חופשיים.

(2) בגוף מבדד טעון במטען חיובי אין אלקטרונים חופשיים.

בתרשים שלפניכם גוף מוליך טעון במטען חיובי, וגוף מבדד טעון במטען חיובי.



ב. הסבירו מדוע השדה החשמלי מתאפס בתוך הגוף המוליך.

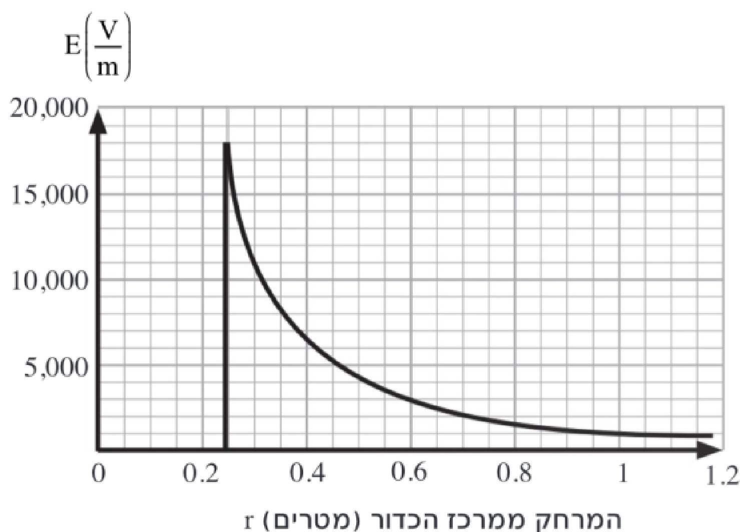
ג. האם פני הגוף המוליך הם משטח שווה פוטנציאל?

ד. הסבירו מדוע השדה החשמלי בנקודה על פני המוליך מאונך לפני המוליך.

ה. מקרבים את הגופים. מהו השינוי בצפיפות האלקטרונים בנקודות A ו–B?

ו. כשמקרבים את הגופים למרחק קטן מאוד זה מזה, נוצרת משיכה ביניהם על אף ששניהם חיוביים. הסבירו כיצד התופעה אפשרית.

.2 נתון גרף של גודל השדה החשמלי כפונקציה של המרחק ממרכזו של כדור מוליך. כיוון השדה החשמלי הוא כלפי מרכז הכדור.



א. הסבירו את צורת הגרף. התייחסו בתשובתכם לתחומים השונים.

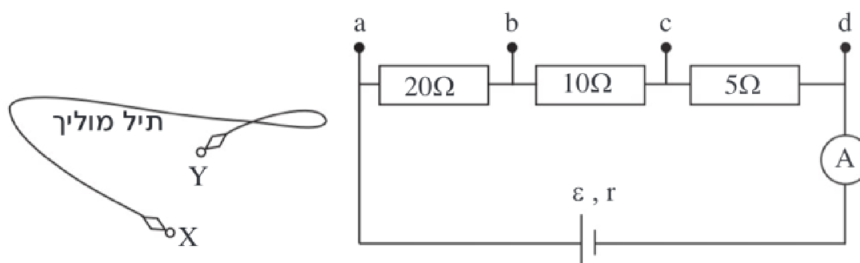
ב. מהו רדיוס הכדור? הסבירו.

ג. חשבו את מטען הכדור ואת סימנו.

ד. שרטטו גרף של הפוטנציאל כפונקציה של המרחק ממרכז הכדור.

ה. מכפילים את רדיוס הכדור בלי לשנות את מטענו. הוסיפו לגרף הפוטנציאל, גרף של הפוטנציאל החדש שנוצר.

3. גבי ואבי מתמודדים עם שאלת חקר. הם מקבלים ערכה הכוללת את המעגל החשמלי הנראה בתרשים להלן, הכולל שלושה נגדים שערכיהם נתונים בתרשים, מקור מתח בעל כא"מ ε והתנגדות פנימית r. כמו כן הם מקבלים תיל מוליך שבשני קצותיו חיבורים X ו-Y שמתאימים לארבעה חיבורים במעגל: d, c, b, a:



בתדריך המשימה נאמר שההתנגדות של כל התילים במעגל זניחה וכך גם ההתנגדות של האמפרמטר. כמו כן המעגל מודפס, ואין התלמידים יכולים לשנות את המעגל או לפרק חלקים ממנו, והותר להם רק לחבר את התיל המוליך לחיבורים לפי בחירתם. אבי וגבי ערכו את הטבלה שלפניכם:

ההתנגדות השקולה החיצונית R_t (ללא הנגד הפנימי)	5Ω	10Ω	15Ω	20Ω	25Ω	30Ω	35Ω
שני החיבורים							
הוריית האמפרמטר	1.0	-	0.60	0.50	0.45	0.40	0.35
מתח ההדקים (V)							

א. העתיקו את הטבלה, וכתבו בשורה השנייה בטבלה את שני החיבורים שאליהם חובר התיל, כדי לקבל את הערך של ההתנגדות המצוין בשורה שמעל.

ב. מדוע פסחו התלמידים על הערך ש-10Ω?

ג. מדוע היססו התלמידים לחבר את התיל לנקודות a ו-d?

ד. איך חשבו התלמידים את מתח ההדקים?

ה. בחרו מהטבלה בשני משתנים מתאימים, ושרטטו גרף המקשר ביניהם. מצאו באמצעות הגרף את ההתנגדות הפנימית של המקור ואת הכא"מ שלו.

ו. סמנו על הגרף נקודה שמתאימה לחיבור התיל לנקודות a ו–d. נמקו.

4. צריכת החשמל הביתי, שלפיה משולם חשבון החשמל, נמדדת ביחידה הנקראת קילוואט שעה: קוט"ש.

א. מהו הגודל הפיזיקלי הנמדד בקוט"ש?

(1) זרם חשמלי.

(2) מתח.

(3) אנרגיה.

(4) הספק.

ב. כמה קוט"ש צורך תנור חימום של 3,000 ואט, הפועל ברציפות במשך יממה?

ג. המירו את הקוט"ש ליחידות .S.I המקובלות.

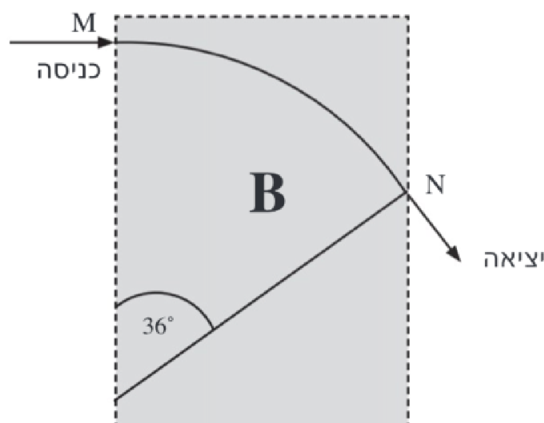
מתח רשת החשמל הביתית בישראל הוא 220 וולט, ואילו מתח רשת החשמל הביתית בארצות הברית הוא 110 וולט. נתונים שני תנורי חימום, ישראלי ואמריקאי, בעלי הספקים שווים.

ד. איזה משני התנורים צורך זרם גדול יותר?

ה. איזה משני התנורים מחמם יותר?

ו. מצאו יתרון אחד וחיסרון אחד למתח רשת החשמל הביתית בישראל, לעומת מתח רשת החשמל הביתית בארצות הברית.

5. אלומת חלקיקים נושאי מטען חיובי נכנסת בנקודה M לאזור של שדה מגנטי אחיד B, המאונך למישור הדף, ויוצאת מהשדה בנקודה N. החלקיקים נעים לאורך הקשת MN, שהיא בעלת רדיוס R וזווית מרכזית של $36°$, בפרק זמן Δt. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מה כיוון השדה, לתוך הדף או מתוך הדף? נמקו.

ב. הביעו את פרק הזמן Δt באמצעות מסת החלקיקים m, מטענם q ועוצמת השדה המגנטי B.

ג. נתון:

$$\Delta t = 3.2 \cdot 10^{-6} s$$
$$B = 4.1 \cdot 10^{-3} T$$

(1) האם אלומת החלקיקים יכולה להיות אלומה של פרוטונים?

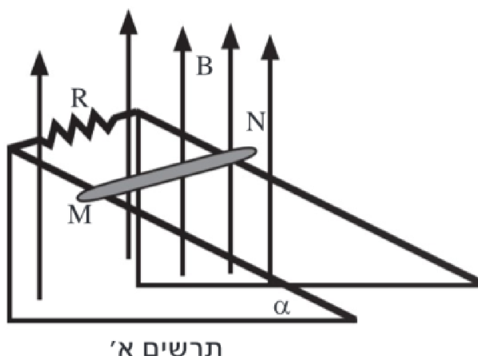
(2) האם אלומת החלקיקים יכולה להיות אלומה של דאוטרונים (חלקיק בעל פרוטון אחד ונויטרון אחד)?

(3) האם אלומת החלקיקים יכולה להיות אלומה של חלקיקי α?

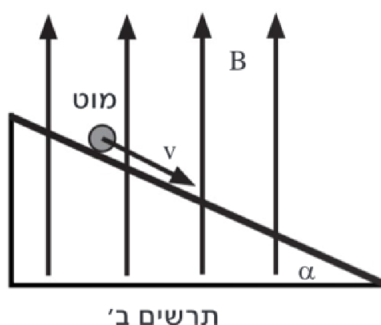
ד. נתון $R = 60cm$. חשבו את מהירות החלקיקים.

השראה אלקטרומגנטית

6. מוט מוליך MN חופשי לנוע ללא חיכוך, בין שתי מסילות מוליכות מקבילות, המשופעות בזווית α. שתי המסילות מחוברות ביניהן דרך נגד R. המרחק בין שתי המסילות הוא L. ההתנגדות של המוט והמסילות זניחה. כל המערכת נמצאת בתוך שדה מגנטי B שכיוונו למעלה. ראו בתרשים א׳:



תרשים א׳



תרשים ב׳

בתרשים ב׳ נראה היטל צד של המערכת. המוט נע במורד המסילות במהירות קבועה v. השדה המגנטי של כדור הארץ זניח.

א. מה כיוון הזרם במוט, לתוך הדף או מתוך הדף? נמקו.

ב. הביעו באמצעות הנתונים לעיל את גודל הזרם הזורם במוט.

ג. מהו כיוון הכוח המגנטי הפועל על המוט? נמקו.

ד. הביעו באמצעות הנתונים לעיל את גודל הכוח.

ה. נתונה מסת המוט m. הביעו את מהירות המוט.

ו. תוך כדי תנועת המוט מנתקים את הנגד. בחרו באפשרות הנכונה והסבירו את בחירתכם:

(1) המוט יאט בהתחלה, ואחר כך ינוע במהירות קבועה נמוכה יותר.

(2) המוט יאיץ בהתחלה, ואחר כך ינוע במהירות קבועה גבוהה יותר.

(3) המוט ייעצר.

(4) המוט ינוע בתאוצה קבועה.

פתרונות מבחן 10

1. א. (1) לא נכון. בגוף מוליך טעון במטען חיובי יש פחות אלקטרונים חופשיים מאשר בגוף ניטרלי, אבל עדיין רוב האלקטרונים החופשיים נמצאים בו.

(2) נכון. בגוף מבדד, טעון או לא טעון, אין אלקטרונים חופשיים, כי אם לא כן, הוא היה מוליך.

ב. כל עוד קיים שדה חשמלי בתוך המוליך, הוא יגרום תנועה של האלקטרונים החופשיים, עד אשר יתייצבו האלקטרונים כך שהשדה החשמלי יתאפס.

ג. במוליך השינוי של הפוטנציאל הוא השדה החשמלי. לכן אם השדה מתאפס, אין שינוי בפוטנציאל. כלומר, הפוטנציאל בתוך גוף מוליך ועל פניו הוא אחיד, לכן פני הגוף הם שווי פוטנציאל.

ד. כל עוד יש לשדה החשמלי שעל פני המוליך רכיב משיקי, הוא יגרום תנועה של האלקטרונים החופשיים, עד אשר יתייצבו האלקטרונים. כך שהרכיב המשיקי של השדה החשמלי יתאפס, ויישאר רק הרכיב האנכי לפני המוליך.

הסבר נוסף: כיוון השדה החשמלי תמיד מאונך למשטח שווה פוטנציאל, השדה החשמלי על פני המוליך מאונך לפני המוליך.

ה. האלקטרונים החופשיים במוליך יימשכו אל הגוף המבדד החיובי, וייצברו בצד הקרוב אליו. לכן בנקודה A תקטן צפיפות האלקטרונים החופשיים, ובנקודה B תגדל צפיפות האלקטרונים החופשיים.

ו. לפי ההסבר לעיל, על אף שהגוף המוליך טעון חיובית, הצד הקרוב לגוף המבדד יכול להיטען במטען שלילי. והמשיכה שלו אל הגוף המבדד החיובי, יכולה לגבור על הדחייה של החלק הטעון חיובית, שמרוחק יותר מהגוף המבדד.

2. א. השדה בתוך המוליך הוא 0. לכן בנקודות פנימיות, שמרחקן ממרכז הכדור קטן מרדיוס הכדור, השדה הוא 0, והגרף מתלכד עם הציר האופקי. בנקודות חיצוניות השדה הולך וקטן עם המרחק ממרכז הכדור, לכן הגרף יורד.

ב. לפי הגרף, עד למרחק של 0.25 מטר ממרכז הכדור השדה מתאפס, ולפי ההסבר בסעיף הקודם, רדיוס הכדור הוא 0.25 מטר.

ג. מחוץ לכדור השדה הוא:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

נחשב את גודל המטען לפי נקודה מהגרף (0.25. 18000) ונציב:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

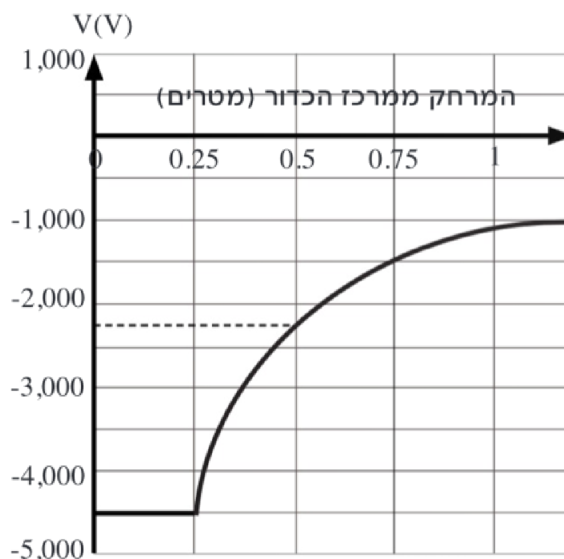
$$|q| = \frac{Er^2}{k} = \frac{18{,}000 \cdot 0.25^2}{9 \cdot 10^9} = 1.25 \cdot 10^{-7}\text{C}$$

המטען הוא שלילי מפני שכיוון השדה הוא כלפי מרכז הכדור.

ד. בנקודות חיצוניות הפוטנציאל הוא: $V = \frac{kq}{r}$. בנקודות פנימיות הפוטנציאל הוא קבוע ושווה לפוטנציאל שעל פני הכדור, כלומר:

$$V = \frac{kq}{R} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(-1.25 \cdot 10^{-7}\right)}{0.25} = -4500\text{V}$$

נשרטט את הגרף:



ה. רדיוס הכדור החדש הוא 0.5 מטר. נחשב את הפוטנציאל על פני הכדור:

$$V = \frac{kq}{R} = \frac{9\cdot10^{9}\cdot\left(-1.25\cdot10^{-7}\right)}{0.5} = -2,250V$$

נוסיף לגרף המקורי את הגרף החדש בקו מקווקו. הפוטנציאל מחוץ לקליפה הוא כאילו כל מטען הקליפה היה מרוכז במרכזה. לכן במרחקים גדולים מ–0.5 מטר הגרף החדש מתלכד עם הגרף המקורי. הפוטנציאל בתוך הקליפה הוא אחיד, ושווה לערך של הפוטנציאל שעל פני הקליפה שערכו 2,250- וולט. לכן הגרף נשאר קבוע במרחקים קטנים מ–0.5 מטר.

3. א. נשלים את הטבלה:

R_t ההתנגדות השקולה החיצונית (ללא הנגד הפנימי)	5Ω	10Ω	15Ω	20Ω	25Ω	30Ω	35Ω
שני החיבורים	a, c	-	a, b	b, d	b, c	c, d	לא חיברו
הוריית האמפרמטר (A)	1.0	-	0.60	0.50	0.45	0.40	0.35
מתח ההדקים (V)	5	-	9	10	11.25	12	12.25

ב. אין דרך להגיע ל–10Ω בלי לפרק חלק מהמעגל. לכן פסחו התלמידים על ערך זה.

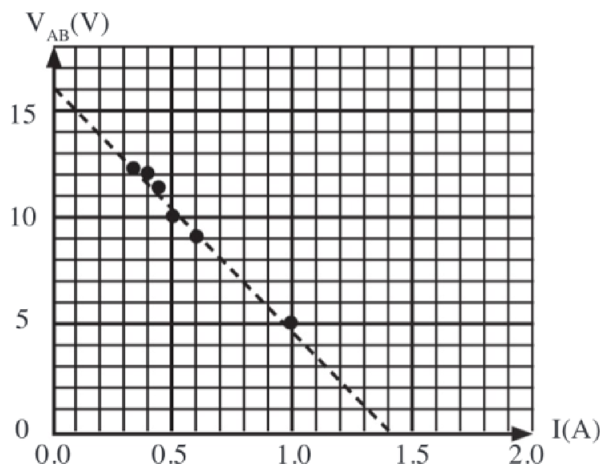
ג. חיבור התיל לנקודות a ו–d יוצר קצר על מקור המתח וזרם מקסימלי יעבור דרכו. התלמידים חששו שמקור המתח ייפגע מזרם גבוה מדי.

ד. מתח ההדקים שווה למכפלת הזרם בהתנגדות השקולה החיצונית:

$$V_{AB} = IR_t$$

גבי ואבי הכפילו את התנגדות השקולה החיצונית בזרם המתאים.

ה. נשרטט את הגרף:



על פי נוסחת מתח ההדקים:

$$V_{AB} = \varepsilon - Ir$$

הכא"מ מיוצג על ידי נקודת החיתוך עם הציר האנכי:

$$\varepsilon = 16V$$

נמצא את ההתנגדות הפנימית לפי השיפוע $r = -m$. נבחר בשתי נקודות מהישר ונחשב את השיפוע:

$(0.1,15)$ $(0.9,6)$:

$$r = -m = -\frac{15-6}{0.1-0.9} = 11.25\Omega$$

ו. חיבור התיל לנקודות a ו-d יוצר קצר, כלומר ההתנגדות השקולה החיצונית מתאפסת, ואיתה מתאפס מתח ההדקים. הזרם המתקבל הוא זרם הקצר:

$$V_{AB} = \varepsilon - Ir$$
$$0 = \varepsilon - Ir$$
$$I = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{16}{11.25} = 1.42A$$

הנקודה המתאימה היא נקודת החיתוך עם הציר האופקי $(1.42\ ,0)$.

4. א. יחידת הקוט»ש היא מכפלת הספק בזמן, כלומר יחידת עבודה או יחידת אנרגיה. התשובה הנכונה היא (3).

ב. 3,000 ואט הם 3 קילוואט. התנור פועל 24 שעות. לפי ההגדרה שניתנה, צריכת האנרגיה היא מכפלת ההספק בזמן, כלומר $72 = 3 \cdot 24$. התנור צורך 72 קוט״ש.

ג. לפי הגדרת ההספק:

$$P = \frac{w}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$
$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 1KW \cdot 1hr = 1{,}000 \cdot 3{,}600 = 3{,}600{,}000J$$

קוט״ש אחד שווה ל־3.6 מיליון ג׳אול.

ד. לפי חוק ג׳אול:

$$P = IV$$
$$I = \frac{P}{V}$$

כאשר ההספק קבוע, הזרם ביחס הפוך למתח. לכן התנור האמריקאי צורך יותר זרם.

ה. קצב החימום הוא למעשה הספק התנור, לכן שני התנורים מחממים באופן דומה.

ו. (1) חיסרון אחד: רשת החשמל של 220 וולט מסוכנת יותר בעת התחשמלות מהרשת של 110 וולט.

(2) יתרון אחד: כפי שראינו בסעיף הקודם, ברשת החשמל של 220 וולט הזרמים הנדרשים נמוכים יותר מהרשת של 110. לכן סכנת התלקחות עקב חימום המוליכים (התילים בקירות) קטנה יותר, וגם נדרשים תילים דקים יותר.

5. א. בנקודה M מהירות החלקיקים היא ימינה, והכוח הפועל עליהם הוא למטה. לפי כלל יד ימין כיוון השדה המגנטי הוא מתוך הדף (אל הקורא).

ב. ראשית נביע את זמן המחזור:

$$\Sigma F = ma$$
$$qvB = m\omega^2 R$$

נציב:

$$v = \omega R$$
$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ונקבל:

$$q \cdot \cancel{\omega R} \cdot B = m\omega^{\cancel{2}} \cancel{R}$$
$$qB = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)$$
$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

החלקיקים נעים בקשת של 36°, כלומר עשירית מעגל $\left(\frac{36^\circ}{360^\circ} = \frac{1}{10}\right)$, לכן:

$$\Delta t = \frac{T}{10} = \frac{\pi m}{5qB}$$

ג. נציב את הנתונים בביטוי שקיבלנו, ונקבל את היחס בין מטען החלקיקים למסתם:

$$\frac{q}{m} = \frac{\pi}{5B \cdot \Delta t} = \frac{\pi}{5 \cdot 4.1 \cdot 10^{-3} \cdot 3.2 \cdot 10^{-6}} = 4.79 \cdot 10^{7}\,\frac{C}{Kg}$$

(1) נבדוק אם היחס בין מטען הפרוטון למסתו מתאים לערך שקיבלנו:

$$\frac{q_p}{m_p} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{1.67 \cdot 10^{-27}} = 9.58 \cdot 10^{7}\,\frac{C}{Kg}$$

קיבלנו יחס כפול בקירוב מהיחס בין מטען החלקיקים למסתם, לכן אלומת החלקיקים אינה אלומה של פרוטונים.

(2) נבדוק אם היחס בין מטען דאוטרון למסתו מתאים לערך שקיבלנו:

$$\frac{q_D}{m_D}=\frac{q_p}{m_p+m_n}=\frac{1.6\cdot10^{-19}}{2\cdot1.67\cdot10^{-27}}=4.79\cdot10^{7}\,\frac{C}{Kg}$$

קיבלנו יחס דומה ליחס בין מטען החלקיקים למסתם, לכן אלומת החלקיקים יכולה להיות אלומת דאוטרונים.

(3) נבדוק אם היחס בין מטען חלקיק α למסתו מתאים לערך שקיבלנו:

$$\frac{q_\alpha}{m_\alpha}=\frac{2\cdot q_p}{2\cdot m_p+2m_n}=\frac{2\cdot1.6\cdot10^{-19}}{4\cdot1.67\cdot10^{-27}}=4.79\cdot10^{7}\,\frac{C}{Kg}$$

(4) קיבלנו יחס דומה ליחס בין מטען החלקיקים למסתם, לכן אלומת החלקיקים יכולה להיות אלומת חלקיקי α.

ד. נביע את הקשר בין המהירות לרדיוס, ונציב את הרדיוס הנתון:

$$\Sigma F=ma$$

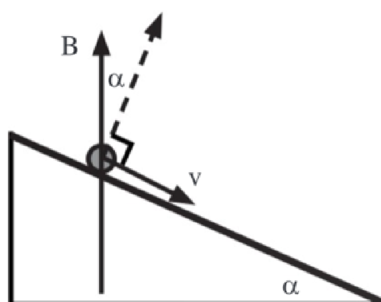
$$qvB=m\frac{v^2}{R}$$

$$v=\frac{qBR}{m}=\frac{q}{m}\cdot BR=4.79\cdot10^{7}\cdot4.1\cdot10^{-3}\cdot0.6=1.18\cdot10^{5}\,\frac{m}{s}$$

6. א. לפי כלל יד ימין, כיוון הזרם הוא מחוץ לדף.

ב. ראשית נביע את הכא"מ המושרה:

$$\varepsilon = vB_{\perp}L = vBL\cos\alpha$$



נביע את הזרם:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBL\cos\alpha}{R}$$

ג. כיוון הכוח מאונך לזרם ולשדה המגנטי. ולפי כלל יד ימין, כיוון הכוח הוא אופקי שמאלה.

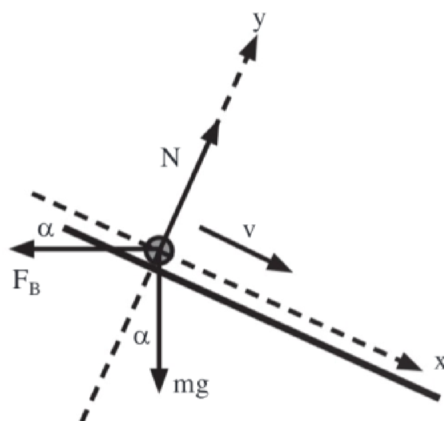
ד. הנוסחה לגודל הכוח היא:

$$F = IB_{\perp}L$$

נשים לב שהשדה המגנטי מאונך לכיוון הזרם, ונביע את גודל הכוח:

$$F_B = IBL = \frac{vBL\cos\alpha}{R} \cdot BL = \frac{vB^2L^2\cos\alpha}{R}$$

ה. המוט במצב התמדה, לכן:



$$\Sigma F_x = 0$$

$$mg\sin\alpha = F_B\cos\alpha$$

$$mg\sin\alpha = \frac{vB^2L^2\cos^2\alpha}{R}$$

$$v = \frac{R\cdot mg\sin\alpha}{B^2L^2\cos^2\alpha}$$

ו. התשובה הנכונה היא (4). ניתוק הנגד יפסיק את הזרם במוט, הכוח המגנטי F_B יתאפס, והמוט יאיץ ללא הפרעה בהשפעת כוח הכובד עד שיגיע לקצה המסילות.

מבחן 11

ענו על שלוש מן השאלות 6–1

1. מטען נקודתי ניצב סמוך ללוח אינסופי, **מוליך**, **לא טעון**. בין המטען הנקודתי ללוח נוצרת משיכה חשמלית. ראו תרשים א׳:



תרשים א׳

א. מדוע על אף שהלוח אינו טעון, המטען הנקודתי נמשך ללוח?

הכוח הפועל על מטען נקודתי הניצב סמוך ללוח אינסופי, מוליך, לא טעון. הוא כאילו, היה ממוקם מעבר ללוח "מטען מראה" המחליף את הלוח. מטען מראה הוא מטען בעל סימן מנוגד הנמצא בנקודה הסימטרית למטען, הנתון ביחס ללוח, כמו עצם ודמותו במראה ישרה. ראו תרשים ב׳:



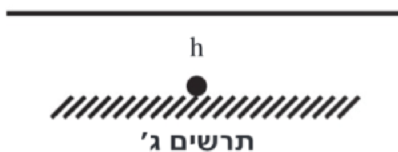
תרשים ב'

נתון כדור זכוכית זעיר שמסתו $m = 3.6 \cdot 10^{-7}\,Kg$, הטעון במטען $q = 2 \cdot 10^{-9}\,C$.

ב. חשבו את גודלו של הכוח החשמלי הפועל על כדור הזכוכית, כשהוא במרחק סנטימטר אחד מלוח אינסופי, מוליך, לא טעון.

ג. חשבו את העבודה נגד הכוחות החשמליים הדרושה כדי להרחיק את הכדור למרחק של 2 סנטימטרים מהלוח.

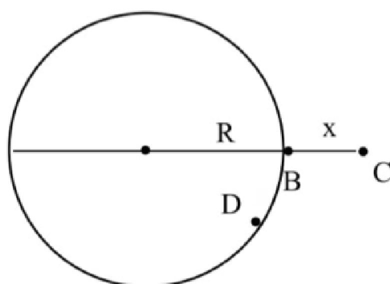
כדור הזכוכית מונח על משטח אופקי מבדד.



תרשים ג'

ד. לאיזה גובה מינימלי מעל הכדור יש למקם לוח אינסופי מקביל למשטח, מוליך, לא טעון, כדי שהכדור יתחיל לנוע לכיוון הלוח?

.2 נתונים שני לוחות LM שהמרחק ביניהם d. הלוח L טעון במטען חיובי בצפיפות משטחית שגודלה σ, והלוח M טעון במטען **שלילי** בצפיפות משטחית שגודלה σ. כן נתונה קליפה כדורית טעונה בעלת רדיוס R. נקודה B נמצאת סמוך לקליפה מצדה החיצוני, ונקודה D נמצאת סמוך לקליפה מצדה הפנימי. נקודה C נמצאת על המשך הרדיוס לנקודה B במרחק x ממנה. ראו בתרשים שלפניכם:





כיוון השדה החשמלי בנקודה B הוא כלפי מרכז הקליפה, וגודלו שווה לגודל השדה החשמלי שבין לוחות הלוחות.

א. הראו שהקליפה הכדורית טעונה במטען שלילי בצפיפות משטחית שגודלה שווה ל-σ.

ב. האם גודל השדה החשמלי בנקודה D שווה לגודל השדה החשמלי בנקודה B, קטן ממנו או גדול ממנו? נמקו.

ג. האם גודל השדה החשמלי בנקודה C שווה לגודל השדה החשמלי בנקודה B, קטן ממנו או גדול ממנו? נמקו.

נתון: הפרש הפוטנציאלים בין לוחות הלוחות שווה להפרש הפוטנציאלים בין נקודה B לנקודה C.

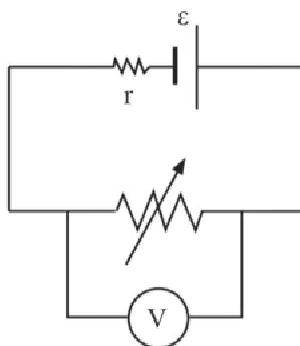
כלומר: $V_{BC} = V_{ML}$

ד. פרוטון 1 משוחרר מנקודה C ונע לעבר נקודה B. ופרוטון 2 משוחרר מלוח L ונע לכיוון לוח M.

(1) האם המרחק d שווה למרחק x, קטן ממנו או גדול ממנו? נמקו.

(2) האם מהירות הפגיעה של פרוטון 1 בקליפה שווה למהירות הפגיעה של פרוטון 2 בלוח M, קטנה ממנה או גדולה ממנה? נמקו.

3. נגד משתנה מחובר למקור מתח בעל כא"מ ε והתנגדות פנימית r. וולטמטר אידאלי מחובר במקביל לנגד המשתנה, ומורה על מתח V. ראו בתרשים שלפניכם:

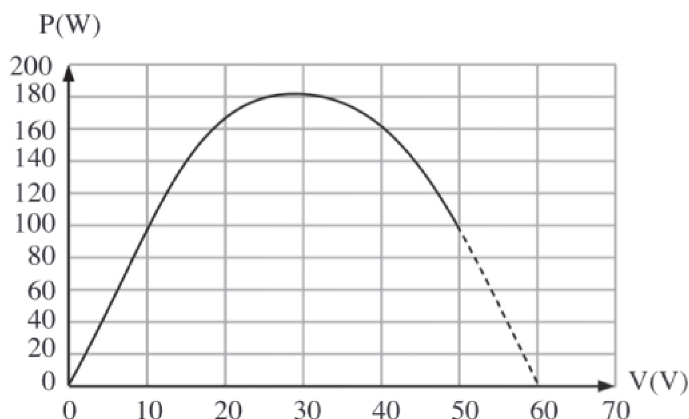


א. הביעו באמצעות V , r , ε את הזרם במעגל ואת הספק הנגד המשתנה.

ב. הביעו באמצעות r , ε את ההספק המקסימלי שיכול להתפתח בנגד המשתנה.

ג. מהי הנצילות כאשר מתקבל ההספק המרבי?

הגרף שלפניכם מתאר את ההספק של הנגד המשתנה כפונקציה של V.



ד. חשבו את הכא"מ ואת ההתנגדות הפנימית של מקור המתח.

ה. הגרף הרציף נפסק במתח של 50 וולט, כי במצב זה התנגדות הנגד המשתנה מגיעה לערכה המרבי. חשבו ערך זה.

.4 לרשותו של עמרי ספק מתח של 30 וולט שהתנגדותו הפנימית זניחה, נגדים שונים ושלוש נורות המפורטות להלן:

- L_1: 6V , 1.5A
- L_2: 18V , 1A
- L_3: 12V , 1.5A

א. עמרי הרכיב מעגל חשמלי הכולל את שלוש הנורות ונגד אחד, כך שהנורות פועלות בהתאם לנתונים. שרטטו את המעגל.

ב. חשבו את התנגדות הנגד.

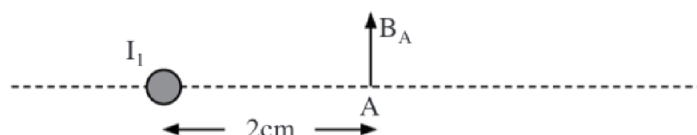
לפתע נשרפה הנורה L_3. עמרי מצא בארון נורה שונה: L_4: 18V , 0.5A.

ג. עמרי הרכיב מעגל חשמלי חדש הכולל את שלוש הנורות L_1, L_2, L_4 ונגד אחד, כך שהנורות פועלות בהתאם לנתונים. שרטטו את המעגל.

ד. חשבו את ההתנגדות של הנגד החדש.

ה. עמרי הוציא את הנורה L_4 מבית הנורה. אורה של אחת הנורות הנותרות נחלש, ואורה של הנורה האחרת גבר. לאחר זמן קצר כבו שתי הנורות. הסבירו את שרשרת האירועים.

.5 העיגול הכהה בתרשים שלפניכם הוא תיל ישר וארוך, המאונך למישור הדף, ונושא זרם I_1.
עוצמת השדה המגנטי, שיוצר הזרם בנקודה A המרוחקת 2 סנטימטרים מהתיל, היא B_A.
כיוונו של השדה הוא למעלה.
ראו בתרשים שלפניכם:



בשאלה זו השדה המגנטי של כדור הארץ זניח.

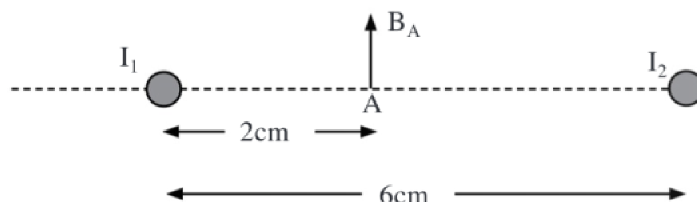
א. העתיקו את התרשים, והוסיפו לו קו של השדה המגנטי העובר דרך A.

ב. הסבירו למה עוצמת השדה המגנטי לאורך קו השדה ששרטטתם קבועה.

נתון: $B_A = 2\cdot10^{-4}T$.

ג. חשבו את הזרם I_1. מה כיוון הזרם, לתוך הדף או מחוץ לדף? הסבירו את קביעתכם.

מוסיפים תיל נושא זרם נוסף I_2, הניצב גם הוא למישור הדף, במרחק של 6 סנטימטרים מהתיל הראשון.



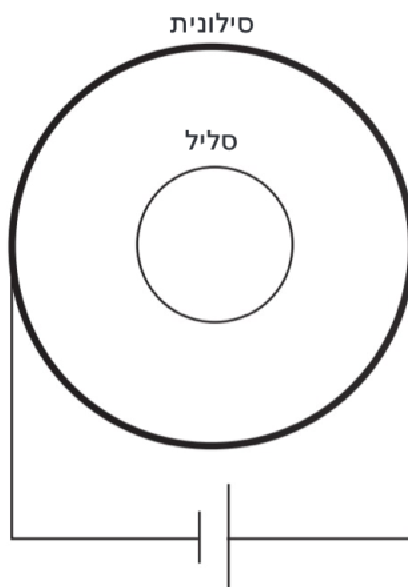
ד. חשבו את גודלו ואת כיוונו של הזרם הדרוש לשדה המגנטי ב–A להתאפס.

ה. חשבו את גודלו ואת כיוונו של הכוח ליחידת אורך, הפועל על התיל I_1.

ו. מצאו ללא חישוב נוסף את גודלו ואת כיוונו של הכוח ליחידת אורך, הפועל על התיל I_2.

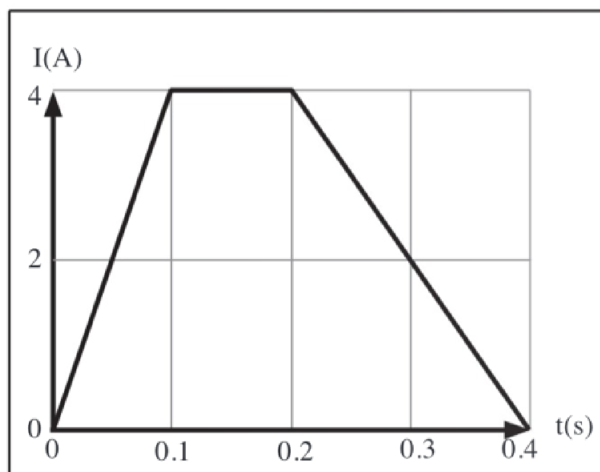
השראה אלקטרומגנטית

6. סליל נמצא בתוך סילונית ארוכה, כך שמישור הסליל מאונך לציר הסילונית. מקור מתח מזרים זרם חשמלי בסילונית. ראו בתרשים שלפניכם:



א. מה כיוון השדה המגנטי הנוצר בתוך הסילונית?

הגרף שלפניכם מתאר את הזרם בסילונית כפונקציה של הזמן.



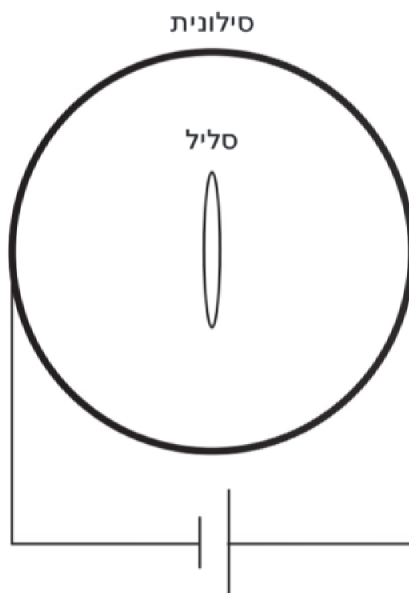
נתונים:

- רדיוס הסילונית: $R = 10\text{cm}$
- צפיפות הכריכות בסילונית: $n = 20\frac{1}{\text{cm}}$ (20 כריכות לסנטימטר)
- רדיוס הסליל: $r = 4\text{cm}$
- מספר הכריכות בסליל: $N = 400$

ב. שרטטו גרף של הכא״מ המושרה בסליל כפונקציה של הזמן.

ג. איזה נתון מספרי מהנתונים לעיל מיותר לחישוב הכא״מ? מה הסיבה שהוא מיותר?

ד. מסובבים את הסליל ב־90°, ומזרימים שנית את הזרם לפי הגרף הנתון. איזה שינוי יחול בגרף הכא״מ?



ה. מחזירים את הסליל לכיוונו המקורי, והפעם משנים את הזרם בסילונית לפי הנוסחה ביחידות .S.I:

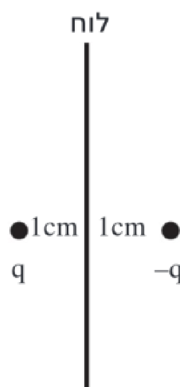
$$I(t) = 0.5t - t^2$$

פתחו ביטוי לכא"מ כפונקציה של הזמן.

פתרונות מבחן 11

1. א. נניח לדוגמה שהמטען הנקודתי הוא חיובי. אלקטרונים חופשיים יימשכו אל המטען, ויצטברו באזור הלוח הקרוב אליו, כך ייווצר אזור טעון שלילית סמוך למטען החיובי, שימשוך אותו כלפי הלוח. אם המטען הנקודתי שלילי, יידחו אלקטרונים חופשיים מהמטען השלילי, וייווצר אזור טעון חיובית שימשוך את המטען השלילי.

ב. המרחק בין הכדור לבין מטען המראה הוא 2 סנטימטרים. נחשב את גודל הכוח:



$$|F|=\left|\frac{kq(-q)}{r^2}\right|=\frac{kq^2}{r^2}=\frac{9\cdot10^9\cdot\left(2\cdot10^{-9}\right)^2}{0.02^2}=9\cdot10^{-5}\text{N}$$

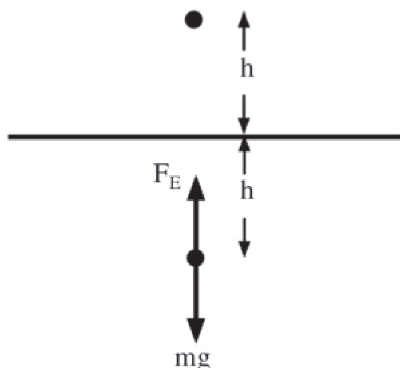
ג. במקרה זה הכדור מתרחק ממטען המראה ממרחק של 2 סנטימטרים למרחק של 4 סנטימטרים. העבודה היא השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של מערכת המטען ומטען המראה:

$$w=\Delta E_p=E_{p2}-E_{p1}=\frac{kq(-q)}{r_2}-\frac{kq(-q)}{r_1}=kq^2\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$$

$$w=9\cdot10^9\cdot\left(2\cdot10^{-9}\right)^2\left(\frac{1}{0.02}-\frac{1}{0.04}\right)=9\cdot10^{-7}\text{J}$$

העבודה הדרושה היא $9\cdot10^{-7}\text{J}$.

ד. כדי שהכדור יתחיל לנוע למעלה, הכוח החשמלי צריך להתגבר על משקל הכדור. על סף התנועה מתקיים שוויון בין הכוחות:



$$F_E = mg$$

$$\frac{kq^2}{(2h)^2} = mg$$

$$4h^2 = \frac{kq^2}{mg}$$

$$h^2 = \frac{kq^2}{4mg} = \frac{9\cdot10^9\left(2\cdot10^{-9}\right)^2}{4\cdot3.6\cdot10^{-7}\cdot10} = 0.0025\text{m}$$

$$h = 0.05\text{m} = 5\text{cm}$$

הגובה המינימלי הוא 5 סנטימטרים.

2. א. מטען הקליפה הוא שלילי כי כיוון השדה החשמלי של הקליפה הוא כלפי מרכזה. נראה שצפיפות המטען המשטחית עליה שווה ל- σ.

גודל השדה החשמלי הנוצר על ידי לוח טעון:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

שני לוחות יוצרים שדה כפול בגודלו:

$$\left|E_{LM}\right| = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

כאשר $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$ ו- σ היא צפיפות המטען המשטחית. נציב ונקבל את גודל השדה בין הלוחות:

$$\left|E_{LM}\right| = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = 4\pi K\sigma$$

כעת נביע את גודל השדה החשמלי בנקודה B:

צפיפות המטען המשטחית מוגדרת ככמות המטען החשמלי ליחידת שטח:

$$\sigma_B = \frac{Q}{A}$$

הנוסחה לשטח פני כדור נתונה בדף הנוסחאות:

$$A = 4\pi R^2$$

נביע את מטען הכדור, ונציב בנוסחת השדה של מטען נקודתי (השדה מחוץ לכדור טעון שווה לשדה שיוצר מטען נקודתי שניצב במרכזו):

$$Q = A\sigma_B = 4\pi R^2 \sigma_B$$
$$|E_B| = \frac{kQ}{R^2} = \frac{k \cdot 4\pi R^2 |\sigma_B|}{R^2} = 4\pi k |\sigma_B|$$

נשווה את שני השדות, ונקבל את הקשר המבוקש:

$$4\pi k |\sigma_B| = 4\pi k\sigma$$
$$|\sigma_B| = \sigma$$

ב. גודל השדה החשמלי בנקודה D קטן מגודל השדה החשמלי בנקודה B. הסבר: השדה החשמלי בתוך קליפה כדורית מתאפס.

ג. גודל השדה החשמלי בנקודה C קטן מגודל השדה החשמלי בנקודה B. הסבר: השדה החשמלי של הקליפה הולך ונחלש עם המרחק ממרכז הקליפה, ואילו השדה החשמלי הנוצר על ידי לוח אינסופי טעון הוא קבוע.

ד. (1) המרחק d קטן מהמרחק x. הסבר: השדה הממוצע הוא הפרש הפוטנציאלים ליחידת אורך.

השדה הממוצע בקטע BC קטן מהשדה הממוצע בין הלוחות כי השדה החשמלי של הקליפה הולך ונחלש עם המרחק ממרכז הקליפה. הפרש הפוטנציאלים שווה לכן:

$$|E_{ML}| = \frac{V_{ML}}{d}$$
$$|E_{BC}| = \frac{V_{BC}}{x}$$
$$|E_{ML}| > |E_{BC}|$$
$$= \frac{V_{ML}}{|E_{ML}|} < \frac{V_{BC}}{|E_{BC}|} =$$

(2) מהירות הפגיעה של פרוטון 1 בקליפה שווה למהירות הפגיעה של פרוטון 2 בלוח M.

הסבר: הפרוטונים נעים בהפרשי פוטנציאלים שווים, לכן העבודה שמבוצעת עליהם שווה.

$$w = qV_{AB} = \Delta E_k$$

שני הפרוטונים רוכשים אנרגיה קינטית שווה, ועל כן מהירותם שווה.

3. א. הוולטמטר מחובר במקביל לנגד המשתנה, אבל גם (שימו לב!) למקור המתח, לכן הוא מורה על מתח ההדקים. נפתח את הביטוי:

$$V = \varepsilon - Ir$$
$$Ir = \varepsilon - V$$
$$I = \frac{\varepsilon - V}{r}$$

קיבלנו ביטוי לזרם במעגל, נביע את ההספק:

$$P = IV = \frac{\varepsilon - V}{r} \cdot V$$
$$P = \frac{\varepsilon V - V^2}{r} = \frac{\varepsilon}{r}V - \frac{1}{r}V^2$$

ב. הביטוי שקיבלנו מבטא גם את ההספק של הנגד. ההספק הוא פונקציה ריבועית של המתח: "פרבולה הפוכה". נמצא את ערך המתח בנקודת הקודקוד – V_M, לפי הנוסחה $V_M = \frac{-b}{2a}$ (אפשר למצוא את V_M גם לפי נגזרת הפונקציה והשוואתה ל-0):

$$b = \frac{\varepsilon}{r} \quad ; \quad a = -\frac{1}{r}$$

$$V_M = \frac{-\frac{\varepsilon}{r}}{2\cdot\left(-\frac{1}{r}\right)} = \frac{\varepsilon}{2}$$

נציב:

$$P = \frac{\varepsilon\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2}{r} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$$

מצאנו את ההספק המקסימלי:

$$P_{Max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$$

ג. נחשב את הנצילות:

$$\eta = \frac{IV}{I\varepsilon} = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon/2}{\varepsilon} = \frac{1}{2}$$

כשההספק מקסימלי הנצילות היא $\frac{1}{2}$ (או 50%).

ד. לפי הגרף, ההספק המקסימלי מתקבל כשמתח ההדקים הוא 30 וולט. לכן לפי הביטויים שקיבלנו:

$$V_M = \frac{\varepsilon}{2} = 30$$
$$\varepsilon = 60V$$

הכא"מ הוא 60 וולט.

לפי הגרף ההספק המקסימלי הוא 180 ואט. נציב בביטוי המתאים:

$$P_{Max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$$
$$180 = \frac{60^2}{4r}$$
$$720r = 3600$$
$$r = 5\Omega$$

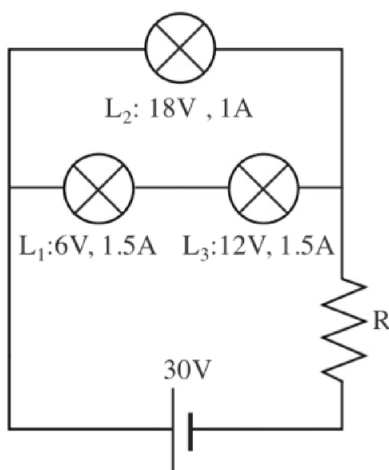
ההתנגדות הפנימית היא 5Ω.

ה. לפי הגרף, כאשר המתח הוא 50 וולט ההספק הוא 100 ואט. נציב בנוסחת ההספק:

$$P = \frac{V^2}{R}$$
$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{50^2}{100} = 25\Omega$$

ההתנגדות המרבית של הנגד המשתנה היא 25 אוהם.

4. א. נחבר בטור את הנורות L_1 ו-L_3 שבהן הזרמים שווים. סכום המתחים על שתי הנורות שווה למתח על הנורה L_2, לכן נחבר אותה במקביל לשתי הנורות:



ב. נמצא את הזרם דרך הנגד לפי חוק הצומת:

$$I_t = I_1 + I_2 = 1.5 + 1 = 2.5A$$

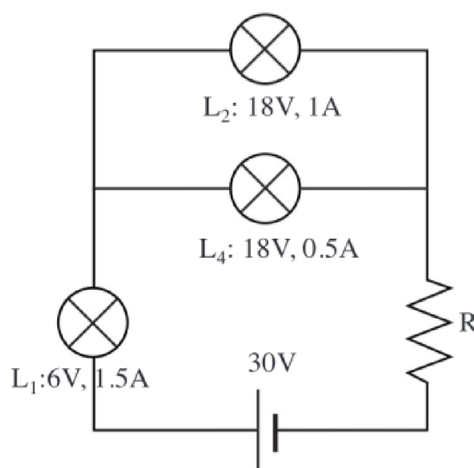
נמצא את המתח על הנגד:

$$\varepsilon = V_{L2} + V_R$$
$$V_R = \varepsilon - V_{L2} = 30 - 18 = 12V$$

נחשב את ההתנגדות לפי חוק אוהם:

$$R = \frac{V_R}{I_t} = \frac{12}{2.5} = 4.8\Omega$$

ג. מכיוון שהזרם בנורה L_1 שווה לסכום הזרמים של L_2 ו-L_4, נחבר את הנורות לפי חוק הצומת:



ד. הזרם בנגד הוא:

$$I_R = I_1 = 1.5A$$

נמצא את המתח על הנגד:

$$\varepsilon = V_{L2} + V_{L1} + V_R$$
$$V_R = \varepsilon - V_{L2} - V_{L1} = 30 - 18 - 6 = 6V$$

נחשב את ההתנגדות לפי חוק אוהם:

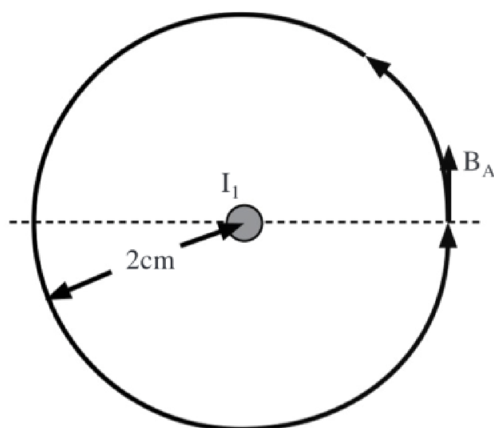
$$R = \frac{V_R}{I_t} = \frac{6}{1.5} = 4\Omega$$

ה. הוצאת הנורה יצרה נתק בענף שלה, ונוצר מעגל טורי לשתי הנורות הנותרות והנגד. ההתנגדות השקולה של המעגל גדלה, וכתוצאה מכך הזרם דרך הנורה L_1 והנגד קטן, לכן גם המתחים על הנורה ועל הנגד קטנים. כתוצאה מכך אורה של נורה L_1 נחלש. מכיוון שהמתחים על הנורה ועל הנגד קטנים, המתח על הנורה L_2 גדל, לפי סכום המתחים במעגל טורי. הנורה L_2 האירה באור חזק יותר, ולאחר זמן קצר נשרפה. שרפת הנורה גרמה נתק במעגל שנותר, וגם הנורה L_1 כבתה.

5. א. קו של השדה המגנטי שיוצר תיל ישר וארוך נושא זרם הוא מעגל שמרכזו בציר התיל.

נשרטט

את קו השדה:



ב. הנוסחה לגודלו של השדה המגנטי סביב תיל ישר ארוך היא:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

כל הנקודות שעל קו השדה נמצאות במרחק שווה מהתיל, לכן לפי הנוסחה השדה לאורך הקו הוא קבוע.

ג. נחשב את הזרם לפי הנוסחה לעיל:

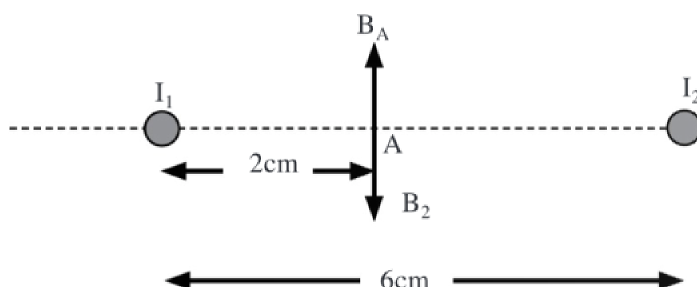
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$I = \frac{2\pi r B}{\mu_0} = \frac{2\pi r B}{4\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{rB}{2\cdot 10^{-7}} = \frac{0.02\cdot 2\cdot 10^{-4}}{2\cdot 10^{-7}} = 20A$$

גודלו של הזרם הוא 20 אמפר. כיוון הזרם הוא מחוץ לדף, לפי כיוון השדה בנקודה A ולפי כלל הבורג.

ד. התיל I_2 יוצר שדה מגנטי B_2 השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לשדה B_A. לפי כלל הבורג, כיוון הזרם I_2 הוא מחוץ לדף, כדי ליצור בנקודה A שדה מנוגד בכיוונו לשדה שיוצר הזרם I_1.

נחשב את גודלו:



$$|B_2| = B_A = 2\cdot 10^{-4} T$$

$$B_A = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}$$

$$I_2 = \frac{2\pi r B_A}{\mu_0} = \frac{2\pi r B_A}{4\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{rB_A}{2\cdot 10^{-7}} = \frac{0.04\cdot 2\cdot 10^{-4}}{2\cdot 10^{-7}} = 40A$$

ה. התיל I_2 יוצר שדה מגנטי בסביבת התיל I_1, שכיוונו למטה לפי כלל הבורג. הכוח הפועל על התיל I_1 הוא **ימינה** לפי כלל יד ימין. נחשב את גודל הכוח לפי הנוסחה של הכוח ליחידת אורך בין שני תילים ארוכים ומקבילים:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}\cdot 20\cdot 40}{2\pi \cdot 0.06} = 0.00267\frac{N}{m}$$

ו. לפי החוק השלישי של ניוטון הכוח ליחידת אורך הפועל על התיל I_2 שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הפועל על התיל I_1, כלומר התילים מושכים זה את זה בכוח של 0.00267 ניוטון לכל מטר של תיל.

6. א. לפי כיוון מקור המתח, הזרם בסילונית זורם נגד כיוון השעון. לפי כלל הבורג, כיוון השדה המגנטי של הסילונית הוא מתוך הדף.

ב. נביע את השטף המגנטי דרך הסליל כפונקציה של הזרם בסילונית:

$$\Phi_B = A \cdot B = \pi r^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_1}{L} I = \pi r^2 \cdot \mu_0 n \cdot I$$

הערות:

- צפיפות הכריכות בסילונית שווה למספר הכריכות חלקי אורך הסילונית. כלומר: $n = \frac{N_1}{L}$.
- 20 כריכות לסנטימטר הן 2,000 כריכות למטר.

נחשב את הכא"מ המושרה בפרקי הזמן השונים:

(1) בפרק הזמן $0 \le t \le 0.1s$:

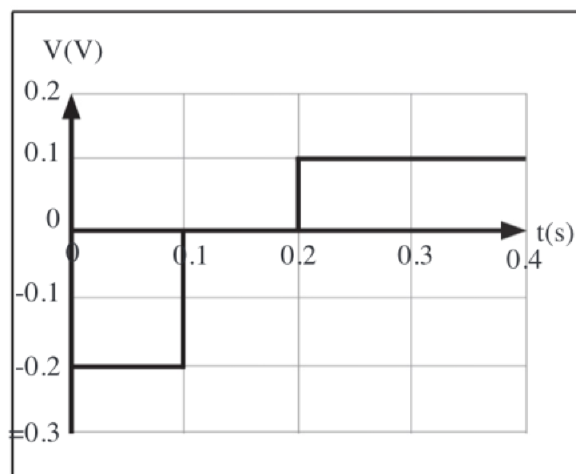
$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -N\frac{\pi r^2 \cdot \mu_0 n \cdot I - 0}{0.1-0} = -400 \cdot \frac{\pi \cdot 0.04^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}000 \cdot 4 - 0}{0.1-0} = -0.202V$$

(2) בפרק הזמן $0.1 \le t \le 0.2s$ השטף קבוע, לכן הכא"מ המושרה הוא 0.

(3) בפרק הזמן $0.2 \le t \le 0.4s$:

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -N\frac{0 - \pi r^2 \cdot \mu_0 n \cdot I}{0.4-0.2} = -400 \cdot \frac{0 - \pi \cdot 0.04^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}000 \cdot 4}{0.2-0} = 0.101V$$

נשרטט את הגרף:



ג. הנתון המיותר הוא רדיוס הסילונית. כי השדה בתוך סילונית ארוכה אינו תלוי ברדיוס הסילונית.

ד. לאחר סיבוב הסליל השדה המגנטי מקביל למישור הסליל. הרכיב הניצב של השדה מתאפס, לכן השטף המגנטי דרך הסליל הוא 0. השטף קבוע בזמן, לכן הכא״מ הוא 0.

ה. ניעזר בסעיף ב׳ ונביע את השטף כפונקציה של הזמן:

$$\Phi_B = \pi r^2 \cdot \mu_0 n \cdot I = \pi r^2 \cdot \mu_0 n\left(0.5t - t^2\right)$$

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot \pi r^2 \cdot \mu_0 n\left(0.5 - 2t\right)$$

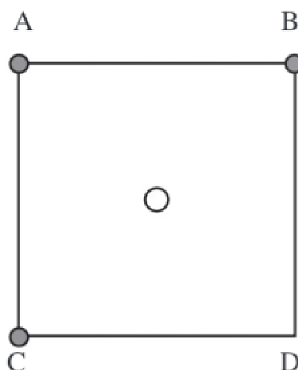
$$\varepsilon = -400 \cdot \pi \cdot 0.04^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}000 \cdot \left(0.5 - 2t\right)$$

$$\varepsilon = -0.00505 \cdot \left(0.5 - 2t\right) = 0.0101t - 0.00253$$

מבחן 12

ענו על שלוש מן השאלות 1–6

1. שלושה מטענים שלילים זהים $q=-2\mu C$ ניצבים ללא יכולת לנוע, בשלושת קודקודיו של ריבוע שצלעו 2 מטרים. הנקודה D היא הקודקוד הרביעי של הריבוע, והנקודה O היא מרכז הריבוע (מפגש האלכסונים).



א. חשבו את האנרגיה הפוטנציאלית של מערכת שלושת המטענים. מה משמעות התוצאה שקיבלתם?

ב. חשבו את גודלו ואת כיוונו של השדה החשמלי בנקודה O.

ג. חשבו את הפוטנציאל החשמלי בנקודות O ו–D.

ד. גוף קטן שמסתו $m=5\cdot10^{-4}\,Kg$, טעון במטען שלילי $Q=-6\mu C$, משוחרר בנקודה O, ונע לכיוון נקודה D.

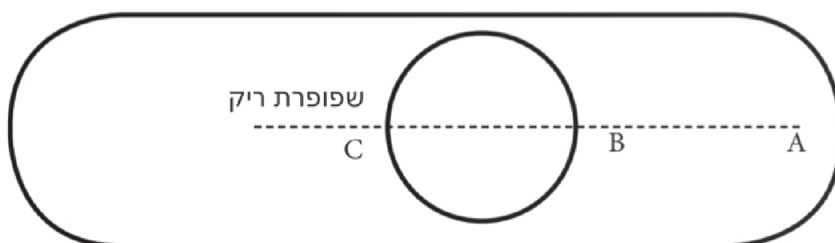
(1) מהי תאוצת הגוף (גודל וכיוון) בנקודה O?

(2) חשבו את גודלה של מהירות הגוף כשהוא חולף בנקודה D.

2. הפוטנציאל של קליפה כדורית מוליכה שרדיוסה $R = 3.6\ cm$ הוא $V = -10^5 V$.

א. חשבו את מטען הקליפה.

כדור זעיר, טעון במטען שערכו שווה למטען הקליפה אך מנוגד בסימנו, משוחרר מנקודה A. מסת הכדור היא $m = 5 \cdot 10^{-9} Kg$. הכדור חודר לתוך הקליפה דרך נקב זעיר B, ויוצא ממנה דרך נקב זעיר נוסף C (הכדור והנקבים אינם מופיעים בתרשים). מהירות הכדור בנקודה B היא $v_B = 2{,}000 \frac{m}{s}$. כל המערכת נמצאת בתוך שפופרת ריק.



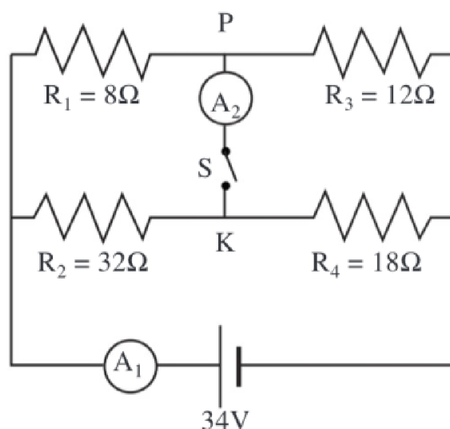
ב. חשבו את הפוטנציאל שמשרה הקליפה בנקודה A.

ג. חשבו את המרחק AB.

ד. מהי מהירות הכדור בנקודה C?

ה. שרטטו גרף איכותי של מהירות הכדור כפונקציה של הזמן, מנקודה A עד שהיא נעצרת. על ציר הזמן סמנו את הנקודות A, B, C.

3. נתון המעגל בתרשים שלפניכם. ההתנגדות של מקור המתח והאמפרמטרים זניחה.



א. מהי קריאת האמפרמטר A_1, כאשר המפסק S פתוח?

סוגרים את המפסק.

ב. מה מראה האמפרמטר A_1?

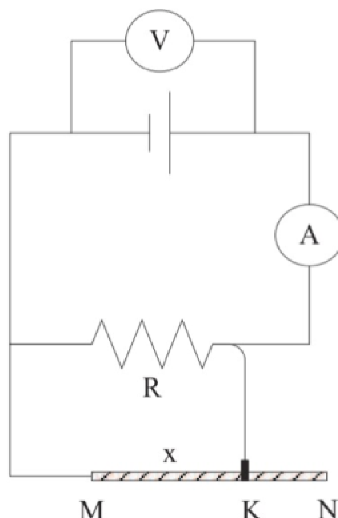
ג. חשבו את הזרם בכל אחד מהנגדים.

ד. על פי חוק הצומת, סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים ממנו.

(1) על איזה עיקרון פיזיקלי מבוסס חוק הצומת?

(2) מה מראה האמפרמטר A_2?

4. רוני מבצעת ניסוי לקראת בחינת הבגרות בחשמל. היא מחברת נגד R ופס מוליך MN למקור מתח בעל כא"מ ε. כמתואר במעגל שלפניכם:



התנגדות הפס ליחידת אורך היא λ. במהלך הניסוי רוני משנה את המרחק של המגע הנייד K מקצה הפס M, ועורכת את הטבלה לעיל של קריאת מכשירי המדידה בערכי x שונים (x – אורך קטע הפס MK). ידוע שמכשירי המדידה שברשותה הם אידאליים.

x(m)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
$\frac{1}{x}\left(m^{-1}\right)$	20	10	6.67	5.0	4.0
V(V)	6V	6V	6V	6V	6V
I(A)	1.9	1.4	1.2	1.0	0.9

א. איזו תכונה של מקור המתח מתבטאת בעובדה שהוריית הוולטמטר אינה משתנה עם שינוי מקומו של המגע הנייד?

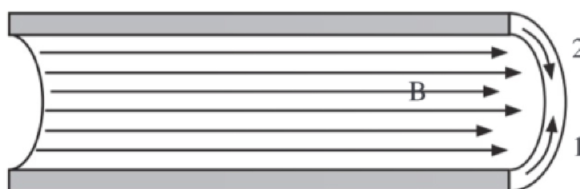
ב. רוני מבטאת את I – הזרם שמורה האמפרמטר, כפונקציה של ε, x, λ, R ומחליטה לשרטט גרף של I כפונקציה של $\frac{1}{x}$, כדי לקבל גרף של קו ישר. הסבירו (ללא שימוש בערכים שבטבלה) מדוע הגרף צפוי להיות ישר בקירוב.

ג. שרטטו את הגרף.

ד. חשבו על פי הגרף את התנגדות הנגד R.

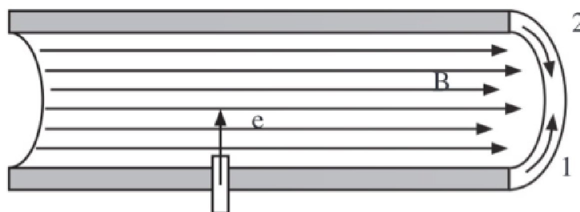
ה. חשבו על פי הגרף את התנגדות הפס ליחידת אורך – λ.

5. בתרשים שלפניכם מתואר חתך של סילונית נושאת זרם. בתוך הסילונית נוצר שדה מגנטי אחיד ימינה, שגודלו 0.005T. אורך הסילונית הוא 40cm, ועוצמת הזרם בתיל הסובב את הסילונית היא 5A.



א. איזה מהחצים 1 או 2 מייצג נכון את מגמת הזרם בסילונית?

ב. מצאו את מספר הכריכות שיש בסילונית בכל סנטימטר.



אלומת אלקטרונים נכנסת לתוך הסילונית בכיוון מאונך לציר הסילונית, במהירות של $v = 6 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$.

ג. מהו גודלו וכיוונו של הכוח המגנטי הפועל על כל אחד מהאלקטרונים ברגע הנראה בתרשים?

ד. חשבו את תדירות הסיבוב של האלקטרונים בתוך הסילונית.

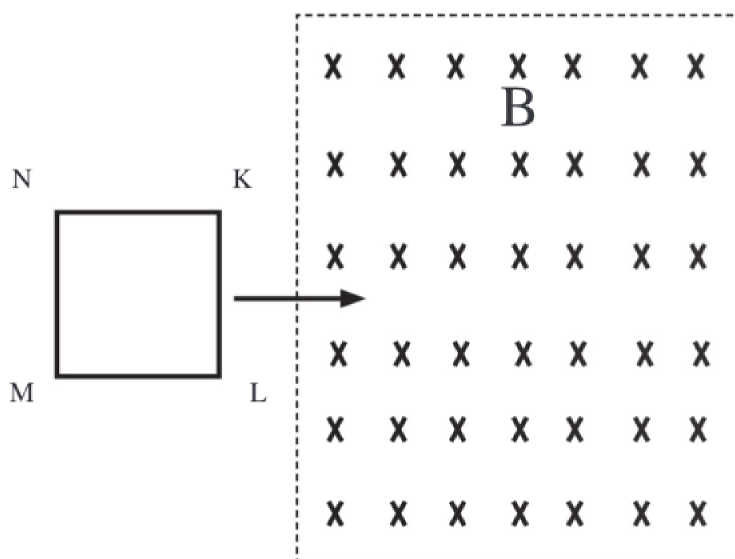
ה. מחליפים את אלומת האלקטרונים באלומת פרוטונים.

(1) האם תשתנה תשובתכם לסעיף ג'? אם כן, מה השינוי? אם לא, נמקו.

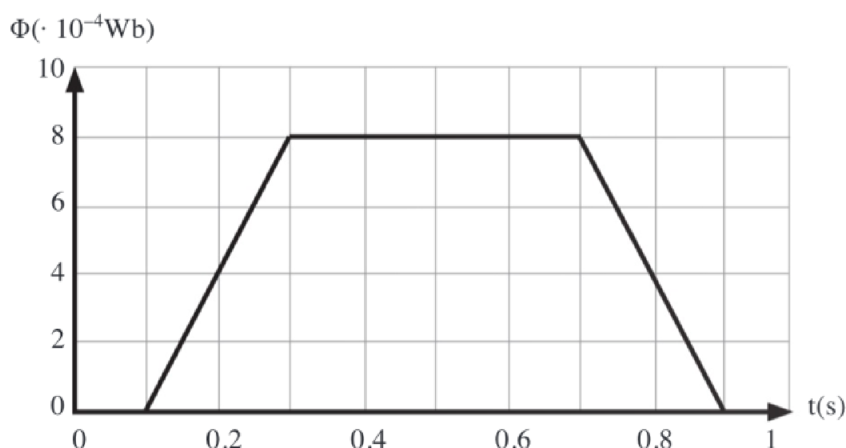
(2) האם תשתנה תשובתכם לסעיף ד'? אם כן, מה השינוי? אם לא, נמקו.

השראה אלקטרומגנטית

6. תיל מוליך מכופף לצורת מסגרת ריבועית KLMN. המסגרת נעה במהירות קבועה, ונכנסת לאזור מלבני שבו שורר שדה מגנטי שגודלו $B = 5 \cdot 10^{-3}T$ וכיוונו לתוך הדף. התנגדות המסגרת היא 0.2 אוהם. ראו בתרשים שלפניכם:



הגרף שלפניכם מתאר את השטף המגנטי דרך המסגרת כפונקציה של הזמן.



א. חשבו בעזרת הגרף את אורך צלע המסגרת.

ב. חשבו את מהירות המסגרת.

ג. מהו רוחבו של האזור שבו שורר השדה המגנטי?

ד. באילו פרקי זמן זורם זרם דרך המסגרת? מה גודלו ומה כיוונו?

ה. שרטטו גרף של הכוח השקול, שמפעיל השדה המגנטי על המסגרת, כפונקציה של הזמן, כאשר הכיוון החיובי הוא ימינה.

פתרונות מבחן 12

1. א. האנרגיה הפוטנציאלית הכוללת של מערכת שלושת המטענים, מורכבת משלושה איברים:

$$U_E(AB) = \frac{kg_A q_B}{r} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(-2 \cdot 10^{-6}\right)^2}{2} = 0.018J$$

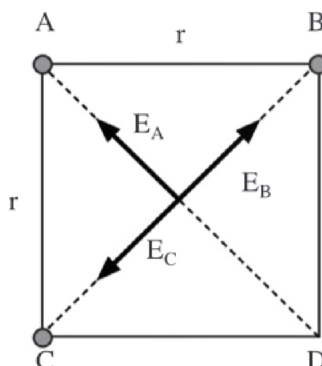
$$U_E(AC) = \frac{kg_A q_C}{r} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(-2 \cdot 10^{-6}\right)^2}{2} = 0.018J$$

$$U_E(BC) = \frac{kg_A q_B}{r\sqrt{2}} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(-2 \cdot 10^{-6}\right)^2}{2\sqrt{2}} = 0.0127J$$

$$U_E = U_E(AB) + U_E(AC) = 0.018 + 0.018 + 0.0127 = 0.0487J$$

האנרגיה הפוטנציאלית הכוללת של המערכת היא 0.0487 ג'אול. משמעות התוצאה היא שיש להשקיע אנרגיה של 0.0487 ג'אול, כדי להביא את שלושת המטענים מאינסוף למקומם בקודקודי הריבוע.

ב. שלושת המטענים שליליים, לכן כיוון השדה שכל מטען יוצר הוא לכיוון המטען. ראו בתרשים שלפניכם:



השדות E_C E_B מבטלים זה את זה, לכן כיוון השדה השקול הוא כלפי מטען A, וגודלו הוא:

$$|E_A| = \frac{k|q|}{OA^2} = \frac{9\cdot 10^9 \cdot 2\cdot 10^{-6}}{\left(\sqrt{2}\right)^2} = 9{,}000\,\frac{N}{C}$$

ג. שלושת המטענים נמצאים במרחקים שווים מנקודה O.

$$AO = BO = CO = \frac{r}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}m$$

נחשב את הפוטנציאל ב–O:

$$V_O = 3\cdot\frac{kq}{r} = 3\cdot\frac{9\cdot 10^9 \cdot\left(-2\cdot 10^{-6}\right)}{\sqrt{2}} = -38{,}200V$$

נחשב את הפוטנציאל ב–D:

$$V_D = \frac{kq}{AD} + \frac{kq}{BD} + \frac{kq}{CD} = \frac{9\cdot 10^9 \cdot\left(-2\cdot 10^{-6}\right)}{2\sqrt{2}} + \frac{9\cdot 10^9 \cdot\left(-2\cdot 10^{-6}\right)}{2} + \frac{9\cdot 10^9 \cdot\left(-2\cdot 10^{-6}\right)}{2}$$
$$= -6{,}360 - 9{,}000 - 9{,}000 = -24{,}360V$$

ד. (1) בסעיף ג' מצאנו את השדה בנקודה O. נחשב את התאוצה לפי הכוח החשמלי הפועל על הגוף:

$$\Sigma F = m\,a$$
$$QE_O = m\,a$$
$$a = \frac{QE_O}{m} = \frac{+6\cdot 10^{-6}\cdot 9{,}000}{5\cdot 10^{-4}} = 108\,\frac{m}{s^2}$$

(2) תאוצת הגוף אינה קבועה, לכן לא נשתמש בתאוצה שקיבלנו, אלא נחשב את המהירות לפי שיקולי אנרגיה:

העבודה שמבצעים הכוחות החשמליים על הגוף מ–O ל–D שווה לשינוי באנרגיה הקינטית שלו:

$$w_{OD} = \Delta E_k$$
$$QV_{OD} = Q\left(V_O - V_D\right) = \frac{1}{2}mv_D{}^2 - \frac{1}{2}mv_O{}^2$$

$$-6\cdot 10^{-6}\cdot\left[-38{,}200-\left(-24.360\right)\right]=\frac{1}{2}\cdot 5\cdot 10^{-4}\cdot v^2-0$$

$$0.083=2.5\cdot 10^{-4}v^2$$

$$v=18.2\frac{m}{s}$$

2. א. הנוסחה לפוטנציאל של קליפה כדורית היא:

$$V=\frac{kq}{R}$$

נציב ונמצא את מטען הקליפה:

$$q=\frac{VR}{k}=\frac{-10^5\cdot 0.036}{9\cdot 10^9}=-4\cdot 10^{-7}C$$

ב. לפי משפט עבודה אנרגיה, העבודה היא שינוי באנרגיה הקינטית של הגוף:

$$w_{AB}=qV_{AB}=\Delta E_K$$

$$qV_A-qV_B=\frac{1}{2}m\cdot v_B{}^2-\frac{1}{2}m\cdot v_A{}^2$$

$$\left(4\cdot 10^{-7}\right)\cdot V_A-\left(4\cdot 10^{-7}\right)\left(-10^5\right)=\frac{1}{2}\cdot 5\cdot 10^{-9}\cdot 2000^2$$

$$\left(4\cdot 10^{-7}\right)\cdot V_A+0.04=0.01$$

$$V_A=-75{,}000V$$

הפוטנציאל בנקודה A הוא 75.000- וולט.

ג. נמצא את מרחקה של נקודה A ממרכז הקליפה:

$$V_A=\frac{kq}{r_A}$$

$$r_A=\frac{kq}{V_A}=\frac{9\cdot 10^9\cdot\left(-4\cdot 10^{-7}\right)}{-75{,}000}=0.048m$$

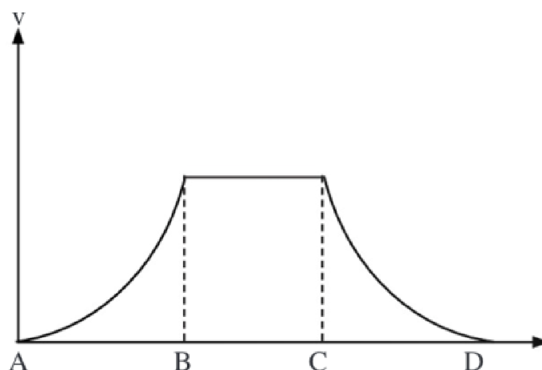
המרחק AB הוא:

$$AB=r_A-R=0.048-0.036=0.012m$$

ד. המהירות בנקודה C שווה למהירות בנקודה B, כי בתוך הקליפה אין שדה חשמלי, והכדור נע במהירות קבועה. הסבר נוסף הוא שאין הפרש פוטנציאלים בין B ל-C, כי הפוטנציאל של גוף מוליך הוא אחיד:

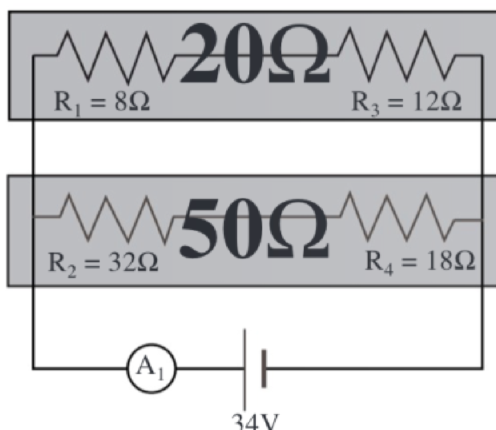
$$v_C = v_B = 2{,}000\,\frac{m}{s}$$

ה. נשרטט את הגרף:



הסבר לגרף: בקטע AB הכדור מתחיל לנוע ממנוחה בתאוצה הולכת וגדלה, כי ככל שהוא מתקרב לקליפה, הכוח החשמלי הפועל עליו גדל. בקטע BC הכדור נע במהירות קבועה. לאחר נקודה C הכדור מאט עד שהוא נעצר בנקודה D, הנמצאת במרחק שווה ממרחקה של A מהמרכז, כך שהגרף בקטע CD סימטרי לגרף בקטע AB.

3. א. נשרטט את המעגל שמתקבל:



נחשב את ההתנגדות השקולה של ארבעת הנגדים. לאחר שמחברים את הנגדים שבטור זה לזה, מקבלים שני נגדים מקבילים של 20Ω ושל 50Ω. לפי הנוסחה לחיבור נגדים במקביל נקבל:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{20} + \frac{1}{50} = \frac{7}{100}$$

$$R_t = \frac{100}{7} = 14.3\Omega$$

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{34}{14.3} = 2.38A$$

קריאת האמפרמטר A_1 היא 2.38 אמפר.

דרך נוספת למצוא את הזרם היא מציאת הזרמים בענפים המקבילים:

הזרם בענף של R_1 הוא:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_3} = \frac{34}{20} = 1.7A$$

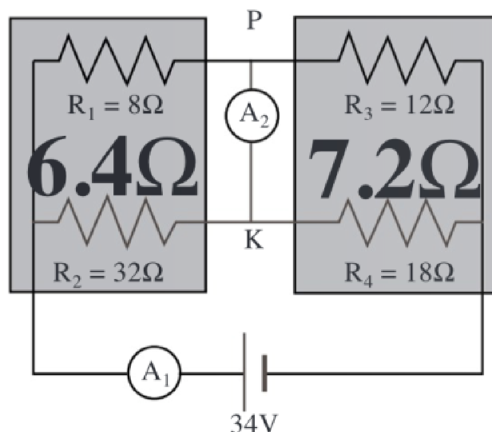
הזרם בענף של R_2 הוא:

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + R_4} = \frac{34}{50} = 0.68A$$

נמצא את הזרם דרך האמפרמטר A_1 לפי חוק הצומת:

$$I_t = I_1 + I_2 = 1.7 + 0.68 = 2.38A$$

ב. עם סגירת המפסק, הפרש הפוטנציאלים בין P ל-K מתאפס. לכן נוצרים שני זוגות של נגדים מקבילים. ראו בתרשים שלפניכם:



נחשב את ההתנגדות השקולה של כל אחד מהזוגות:

$$\frac{1}{R_{1,2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{8} + \frac{1}{32} = \frac{5}{32}$$

$$R_{1,2} = \frac{32}{5} = 6.4\Omega$$

$$\frac{1}{R_{3,4}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{12} + \frac{1}{18} = \frac{5}{36}$$

$$R_{3,4} = \frac{36}{5} = 7.2\Omega$$

שני הנגדים השקולים שחישבנו מחוברים בטור. נחבר אותם, ונמצא את ההתנגדות השקולה של המעגל ואת הזרם דרך האמפרמטר A_1:

$$R_t = R_{1,2} + R_{3,4} = 6.4 + 7.2 = 13.6\Omega$$

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{34}{13.6} = 2.5A$$

קריאת האמפרמטר A_1 היא 2.5 אמפר.

ג. נחשב את הזרמים I_1 ו-I_2 בנגדים R_1 ו-R_2 בהתאמה. המתחים על שני הנגדים שווים, וסכום הזרמים שווה ל-2.5 אמפר. נבנה מערכת של שתי משוואות:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_t \\ I_1R_1 = I_2R_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = 2.5 \\ 8I_1 = 32I_2 \end{cases}$$

פתרון המערכת הוא:

$$I_1 = 2A$$
$$I_2 = 0.5A$$

מצאנו את הזרמים בזוג הנגדים הראשון. נחזור על הפעולה לזוג השני:

$$\begin{cases} I_3 + I_4 = I_t \\ I_3R_3 = I_4R_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_3 + I_4 = 2.5 \\ 12I_3 = 18I_4 \end{cases}$$

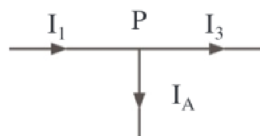
פתרון המערכת הוא:

$$I_3 = 1.5A$$
$$I_4 = 1A$$

מצאנו את ארבעת הזרמים.

ד. (1) חוק הצומת מבוסס על חוק שימור המטען. כמות המטען הכוללת הנכנסת לצומת שווה לכמות המטען הכוללת היוצאת ממנו.

(2) לפי חוק הצומת בצומת המסומן ב-P:

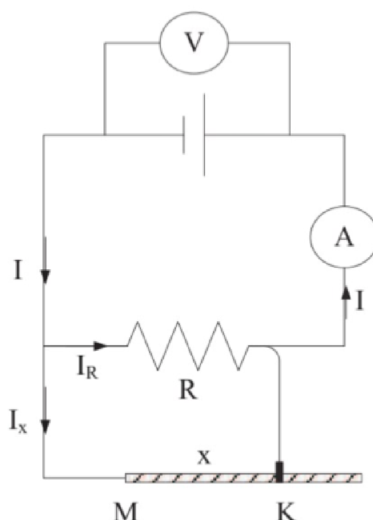


$$I_1 = I_3 + I_A$$
$$2 = 1.5 + I_A$$
$$I_A = 0.5A$$

האמפרמטר A_2 מראה זרם של 0.5 אמפר.

.4 א. הוולטמטר מחובר במקביל למקור המתח, לכן הוא מורה את מתח ההדקים של המקור.
העובדה שמתח ההדקים אינו משתנה עם שינוי הזרם, מעידה על כך שההתנגדות הפנימית של המקור אפסית. לפי הנוסחה $V_{AB} = \varepsilon - Ir$ מתח ההדקים של המקור תלוי בזרם, ורק כאשר $r = 0$ הוא קבוע ומתקיים: $V_{AB} = \varepsilon$.

ב. לפי חוק הצומת, הזרם שעובר באמפרמטר שווה לסכום הזרמים שבנגד R ובפס x:



$$I = I_R + I_x$$

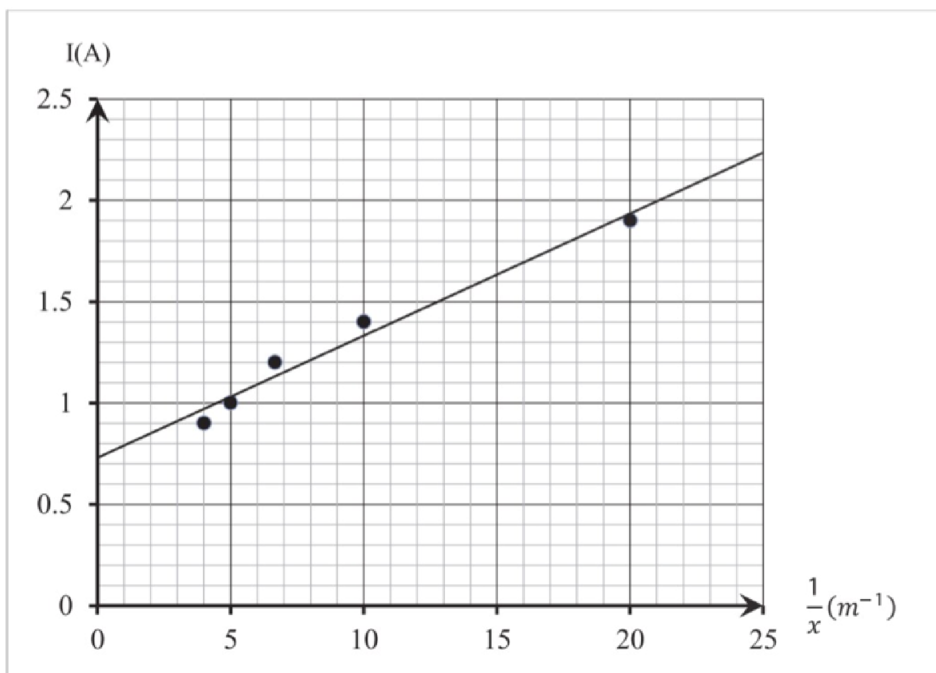
λ היא ההתנגדות ליחידת אורך, לכן: $R_x = \lambda x$.
שני הנגדים מחוברים במקביל למקור המתח לכן:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} + \frac{\varepsilon}{\lambda x}$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} + \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot \frac{1}{x}$$

קיבלנו ביטוי הדומה למשוואת ישר, אשר שיפועו הוא $m = \frac{\varepsilon}{\lambda}$ ונקודת חיתוך $n = \frac{\varepsilon}{R}$:

ג. נשרטט את הגרף:



ד. לפי הטבלה $V = \varepsilon = 6V$. נחשב את התנגדות הנגד R לפי נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האנכי – $(0, 0.75)$:

$$n = \frac{\varepsilon}{R}$$

$$0.75 = \frac{6}{R}$$

$$R = 8\Omega$$

ה. נחשב את λ לפי השיפוע. נבחר בשתי נקודות מהגרף – (21.2) $(1, 0.8)$ ונחשב את השיפוע:

$$m = \frac{2 - 0.8}{21 - 1} = \frac{1.2}{20} = 0.06A \cdot m$$

נחשב את ההתנגדות ליחידת אורך:

$$m = \frac{\varepsilon}{\lambda}$$

$$0.06 = \frac{6}{\lambda}$$

$$\lambda = 100\frac{\Omega}{m}$$

5. א. החץ המתאים הוא חץ 1. לפי כלל הבורג, מכוונים את האגודל ימינה, לכיוון השדה, ומקבלים את כיוון הזרם בסילונית.

ב. לפי הנוסחה של השדה המגנטי בתוך סילונית:

$$B = \mu_0 I \frac{N}{L}$$

$$\frac{N}{L} = \frac{B}{\mu_0 I} = \frac{0.005}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5} = 796 \frac{1}{m}$$

צפיפות הכריכות היא כ-796 כריכות למטר, שהן כ-8 כריכות לסנטימטר.

ג. הכוח הוא כוח לורנץ. נחשב את הכוח:

$$F = qvB = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{5} \cdot 0.005 = 4.8 \cdot 10^{-16} N$$

כיוון הכוח הוא מחוץ לדף לפי כלל יד ימין (נזכור שמטען האלקטרונים הוא שלילי).

ד. נמצא ביטוי לתדירות:

$$F = ma$$

$$q\cancel{v}B = m\frac{v^{\cancel{2}}}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

$$\cancel{v} = \omega R = \omega \frac{m\cancel{v}}{qB}$$

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$$

נציב ונמצא את התדירות:

$$f = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.005}{2\pi \cdot 9.11 \cdot 10^{-31}} = 1.40 \cdot 10^{8} Hz$$

ה. (1) מטען הפרוטון שווה בגודלו למטען האלקטרון, לכן לא יהיה שינוי בגודל הכוח, אבל כיוון הכוח יהיה מנוגד, כלומר לתוך הדף.

(2) לפי הביטוי לתדירות, התדירות תקטן, כי מסת הפרוטון גדולה יותר.

6. א. השטף המרבי מתקבל כאשר המסגרת כולה נמצאת בתוך השדה המגנטי. לפי הגרף, השטף המרבי הוא $\Phi_B = 8\cdot10^{-4}\,\text{Wb}$. לכן:

$$\Phi_B = B_{\perp}A = Ba^2$$
$$a = \sqrt{\frac{\Phi_B}{B}} = \sqrt{\frac{8\cdot10^{-4}}{5\cdot10^{-3}}} = 0.4\text{m}$$

אורך צלע המסגרת היא 0.4 מטר.

ב. פרק הזמן שבו נכנסת המסגרת לשדה הוא מ- $t = 0.1\text{s}$ ל- $t = 0.3\text{s}$. בפרק זמן זה המסגרת עוברת מרחק של 0.4 מטר. לכן:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0.4}{0.3-0.1} = 2\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

מהירות המסגרת היא 2 מטרים לשנייה.

ג. המסגרת כולה בתוך השדה המגנטי בפרק הזמן $t = 0.3\text{s}$ ל- $t = 0.7\text{s}$. בפרק זמן זה המסגרת עוברת מרחק של $\Delta x = vt = 2\cdot(0.7-0.3) = 0.8\text{m}$. למרחק זה צריך להוסיף את צלע המסגרת. לכן רוחב האזור הוא 1.2 מטר.

ד. הזרם נוצר כאשר קיים כא"מ מושרה במסגרת, כתוצאה של שינוי השטף. לכן זורם זרם בפרקי הזמן $0.1\text{s} < t < 0.3\text{s}$ ו- $0.7\text{s} < t < 0.9\text{s}$.

(1) נחשב את גודל הזרם בפרק הזמן $0.1\text{s} < t < 0.3\text{s}$:

$$|I| = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1}{R}\left|-\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}\right| = \frac{1}{0.2}\left(\frac{8\cdot10^{-4}-0}{0.3-0.1}\right) = 0.02\text{A}$$

את כיוון הזרם נמצא לפי חוק לנץ: ההפרעה היא גידול השטף, לכן השדה המגנטי המושרה הוא מתוך הדף, ולפי כלל הבורג כיוון הזרם הוא נגד כיוון השעון.

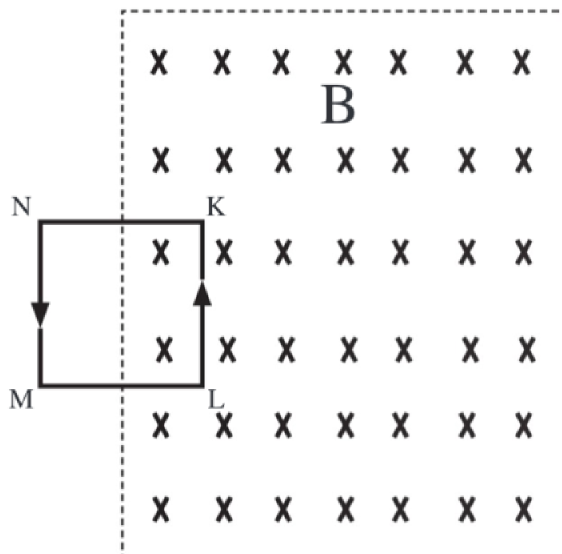
(2) נחשב את גודל הזרם בפרק הזמן $0.7s < t < 0.9s$:

$$|I| = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1}{R}\left|-\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}\right| = \frac{1}{0.2}\left(-\frac{0-8\cdot 10^{-4}}{0.9-0.7}\right) = 0.02A$$

את כיוון הזרם נמצא לפי חוק לנץ: ההפרעה היא הקטנת השטף, לכן השדה המגנטי המושרה הוא לתוך הדף, ולפי כלל הבורג כיוון הזרם הוא עם כיוון השעון.

ה. כוח על המסגרת נוצר כאשר זורם בה זרם, כלומר בפרקי הזמן $0.1s < t < 0.3s$ ו- $0.7s < t < 0.9s$.

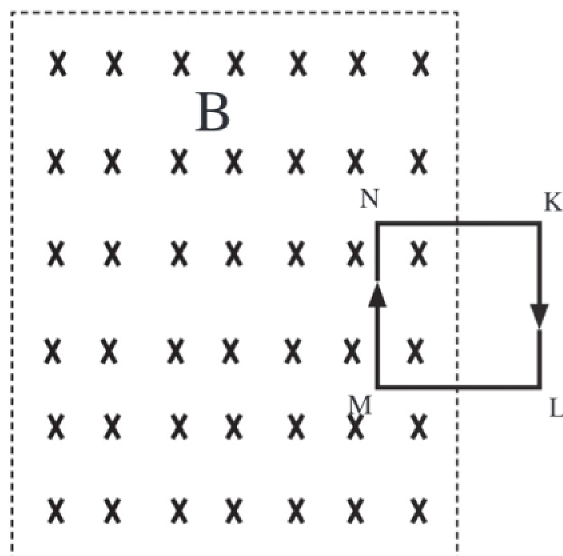
(1) בפרק הזמן $0.1s < t < 0.3s$ פועל כוח על הצלע LK (הכוחות על הצלעות KN ו-ML מבטלים זה את זה). נחשב את גודל הכוח:



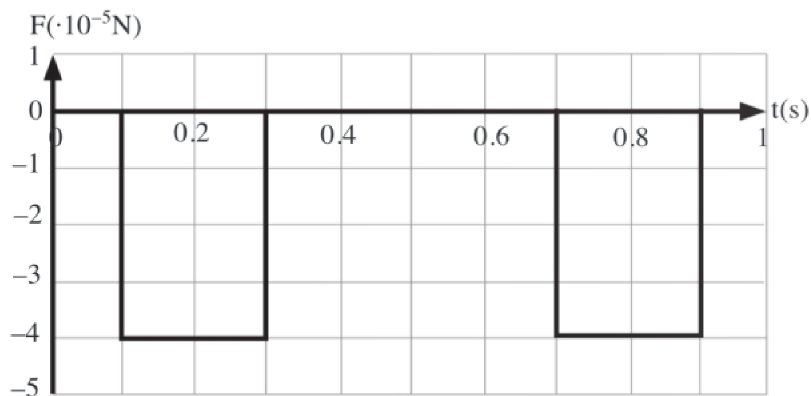
$$F = IBL = 0.02\cdot 5\cdot 10^{-3}\cdot 0.4 = 4\cdot 10^{-5}N$$

לפי כלל יד ימין, כיוון הכוח הוא שמאלה, הפוך מהכיוון החיובי.

(2) בפרק הזמן $0.7s < t < 0.9s$ פועל כוח על הצלע MN. גודל הכוח שווה לגודל הכוח שמצאנו קודם.

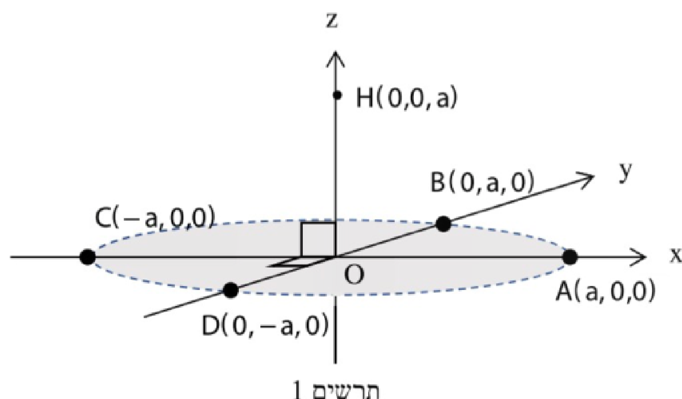


לפי כלל יד ימין, כיוון הכוח הוא שוב שמאלה. נשרטט את הגרף:



מבחן 13

1. בתרשים 1 מתוארת מערכת של 4 מטענים חיוביים זהים $q_A = q_B = q_C = q_D = \frac{Q}{4}$ הנמצאים בקודקודיו של ריבוע ABCD בהתאמה. הריבוע מונח במישור xy של מערכת צירים קרטזית (הצירים x, y, z מאונכים זה לזה), כך שארבעת קודקודיו נמצאים על הצירים במרחק a מהראשית O. הערה: בתרשים משורטט המעגל החוסם את הריבוע שתפקידו להמחיש את המבנה התלת ממדי של המערכת.



תרשים 1

א. האם השדה החשמלי בראשית הצירים שווה ל-0? אם כן, הסבירו את המשמעות הפיזיקלית של שדה החשמלי בנקודה השווה ל-0. אם לא, הביעו באמצעות a, k ו-Q (k הקבוע האלקטרוסטטי) את גודלו של השדה וציינו את כיוונו.

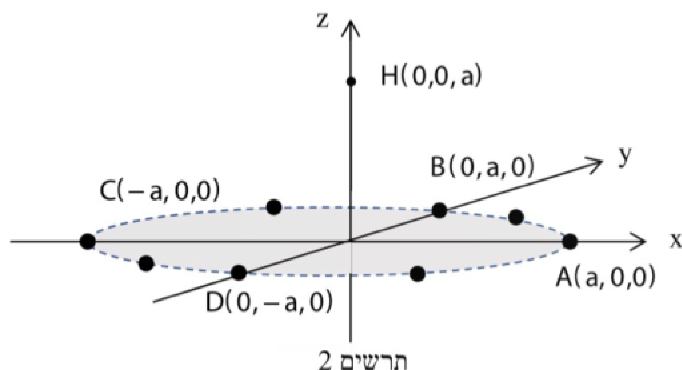
ב. האם הפוטנציאל החשמלי בראשית הצירים שווה ל-0? אם כן, הסבירו מדוע. אם לא, הביעו באמצעות a, k ו-Q את הפוטנציאל בראשית הצירים.

ג. מציבים בנקודה H(0,0,a) גוף נקודתי ובעל מטען חשמלי שלילי $-q$.

(1) הביעו את גודלו ומצאו את כיוונו של השדה החשמלי בנקודה H.

(2) הביעו את גודלו ומצאו את כיוונו של הכוח החשמלי הפועל על הגוף בנקודה H.

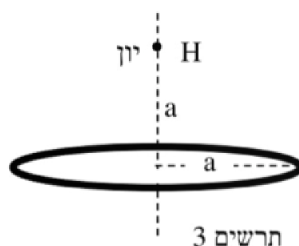
ד. מחלקים את המטען Q ל-8 מטענים הנמצאים בקודקודים של מתומן משוכלל – מצולע בן 8 צלעות שוות, כך שהמטען בכל קודקוד הוא $\frac{Q}{8}$, ומרחקו הוא a מהראשית. ראו בתרשים 2:



תרשים 2

האם ישתנו התשובות לסעיפים הקודמים בעקבות החלפת הריבוע במתומן? אם כן ציינו את השינוי ואם לא, נמקו.

ה. בכלי מרוקן מאוויר נתונה טבעת זהב דקה בעלת רדיוס a הטעונה במטען חיובי Q, המפוזר לאורכה בצפיפות אחידה. יון שלילי של ברום שמסתו m ומטענו כמטען האלקטרון, משוחרר ממנוחה בנקודה H, הנמצאת על הישר המאונך למישור הטבעת והעובר במרכזה. נקודה H מרוחקת מרחק a ממרכז הטבעת. ראו בתרשים 3:



תרשים 3

היון מתחיל לנוע לעבר מרכז הטבעת.

נתון:

$a = 2cm$

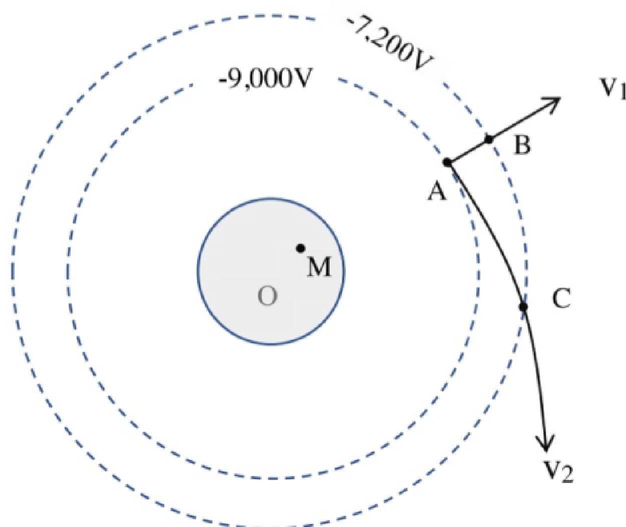
$Q = 5 \cdot 10^{-7} C$

$m = 1.32 \cdot 10^{-25} Kg$

$q = -1.6 \cdot 10^{-19} C$

הזניחו את כוח הכובד וחשבו את מהירות היון בחולפו במרכז הטבעת.

2. נתונים גוף כדורי טעון שמרכזו O ושני משטחים שווי פוטנציאל כדוריים שמרכזם ב–O. הנקודות A ו–B נמצאות מחוץ לגוף על המשטחים שווי הפוטנציאל של ‎-9,000V‏ ושל ‎-7,200V‏ בהתאמה. נקודה M נמצאת בתוך הגוף הכדורי במחצית הרדיוס, הנקודות B, A, M, O נמצאות על ישר אחד, ואורך הקטע AB הוא 5cm . הפוטנציאל באין סוף הוא 0.



א.חשבו את מטען הגוף.

חלקיק a מורכב משני פרוטונים ומשני נויטרונים, הקשורים יחד בקשר חזק ויכולים להיחשב כחלקיק יחיד. מסתו של חלקיק ה–a היא $m_a = 6.44 \cdot 10^{-27} Kg$ ומטענו – ‎+2e.

ב. חשבו את המהירות המינימלית v1 הדרושה לחלקיק a בנקודה A כדי לחלוף דרך נקודה B, ולהימלט למרחק אין סופי מהכדור.

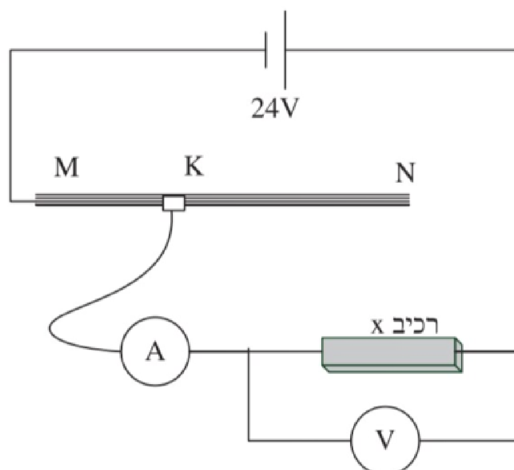
ג. V_2 היא המהירות המינימלית הדרושה לחלקיק a בנקודה A כדי לחלוף דרך נקודה C, ולהימלט למרחק אין סופי מהכדור. נקודה C נמצאת גם היא על משטח שווה פוטנציאל של ‎-7,200V. האם V_2 גדולה מ V_1 קטנה ממנה או שווה לה?

ד. לחומר הגוף הכדורי יש תכונה לתפוח עם הזמן כך שרדיוס הגוף גדל, אך מטענו וצורתו הכדורית נשמרים (נקודה A עדיין חיצונית לכדור).

(1) האם הפוטנציאל בנקודה A יגדל, יקטן או יישאר ללא שינוי? נמקו.

(2) האם הפוטנציאל בנקודה M יגדל, יקטן או יישאר ללא שינוי? נמקו.

3. תלמידי מגמת הפיזיקה חוקרים את האופיין של "רכיב X", קופסה אטומה שתוכנה לא ידוע להם. הם מרכיבים את המעגל שלפניכם: מקור המתח ומכשירי המדידה שברשותם אידאליים.



כדי לקבל ערכים שונים של המתח על "רכיב X" הם משנים את מקומו של מגע נייד K לאורכו של פס מוליך אחיד MN. המדידות שבוצעו ממוספרות בדיאגרמת הפיזור שלהלן:

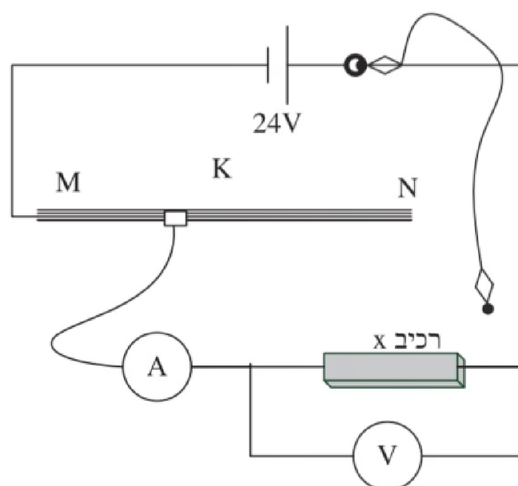
מספר	1	2	3	4	5	6	
V(V)	24	21	18	15	12	9	0
I(A)	2.50	1.70	1.20	0.80	0.55	0.25	0

א. באחת מהמדידות התלכד המגע הנייד עם הקצה M. באיזו מדידה? נמקו.

ב. התלמידים הוסיפו לטבלה גם את הנקודה (0,0). האם אפשר לבצע מדידה שתאשר זאת? אם כן, הסבירו כיצד ואם לא, הסבירו מדוע.

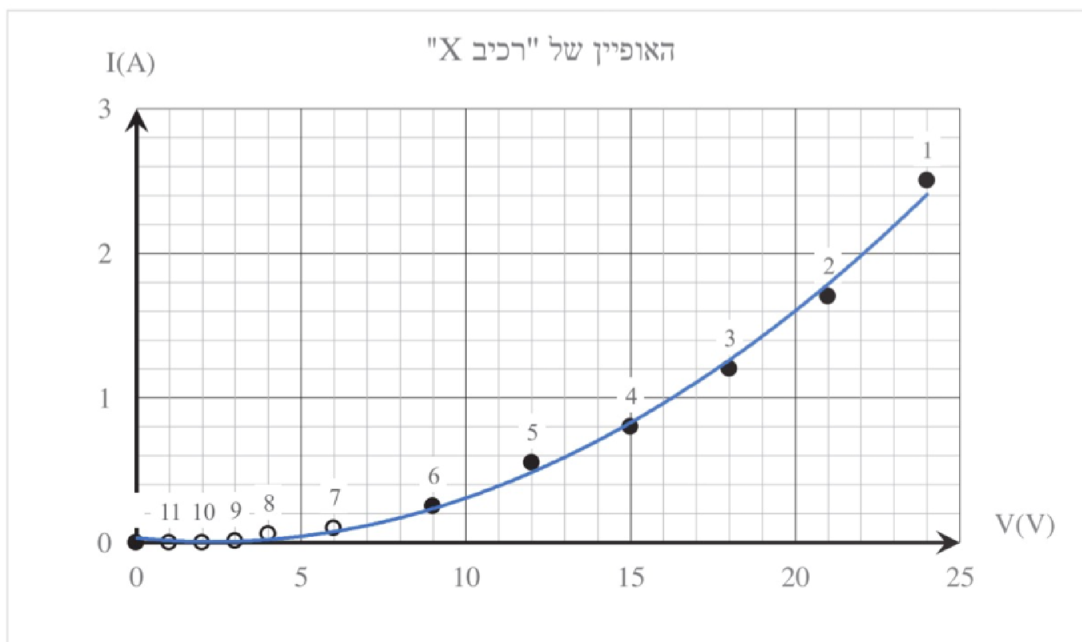
ג. התלמידים מגלים שאי אפשר לקבל במערכת הנתונה מתחים על "הרכיב X" בין 0 ל-9V. מצאו בעזרת עובדה זו את ההתנגדות של הפס NM באורכו המלא.

התלמידים מבינים שבמערכת שהרכיבו אי אפשר לקבל מתחים על "הרכיב X" בין 0 ל-9V. כדי לקבל מתחים אלה הם מחברים קצה אחד של תיל מוליך אל ההדק החיובי של מקור המתח, ואת הקצה השני לנקודה אחרת במעגל.



ד. לאיזו נקודה יש לחבר את הקצה השני כדי לקבל את המתחים המבוקשים? לאחת מהנקודות N, K, M או לנקודה אחרת?

לפניכם האופיין המלא, כולל המדידות החדשות שביצעו התלמידים (בעיגול ריק).



ה. האם ההתנגדות של "רכיב X" עולה עם עליית המתח, יורדת או קבועה?

ו. מה נכון לומר על תכונותיו של הרכיב במתחים הנמוכים מ-3 וולט:

I הרכיב חסר התנגדות משמעותית.

II הרכיב יוצר נתק.

4. בתרשים 1 נתון מצפן המונח במישור אופקי. הקוטב הצפוני של מחט המצפן הוא הצד המושחר.



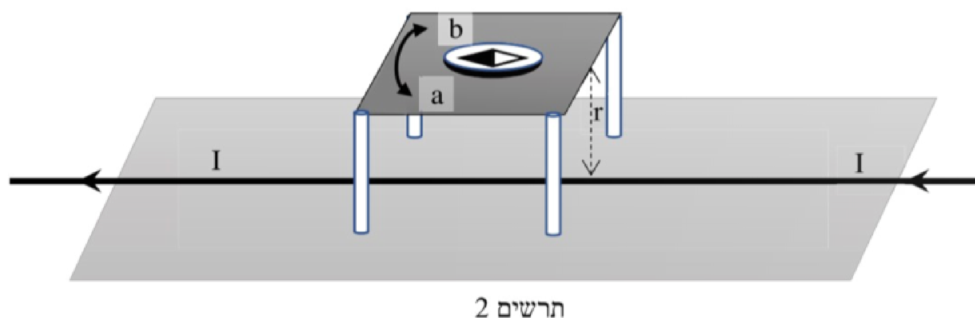
תרשים 1

א. אם ננוע בעקבות הקוטב הצפוני של מחט המצפן, לאן נגיע לבסוף?

(1) האם נגיע לקרבת הקוטב הגאוגרפי הדרומי (לאנטרקטיקה) או לקוטב הגאוגרפי הצפוני?

(2) האם נגיע לבסוף לקוטב <u>המגנטי</u> הדרומי של כדור הארץ או לקוטב <u>המגנטי</u> הצפוני של כדור הארץ?

בתרשים 2 שלפניכם מונח מצפן אופקי בגובה r מעל תיל מוליך וארוך. כאשר התיל נושא זרם I, המחט סוטה מהכיוון ההתחלתי בזווית θ. כלומר, בזווית θ יחסית לכיוון שאליו פונה מחט המצפן בשעה שלא זורם זרם בתיל.



תרשים 2

ב. לאיזה כיוון סוטה המחט? לכיוון (a) או לכיוון (b)?

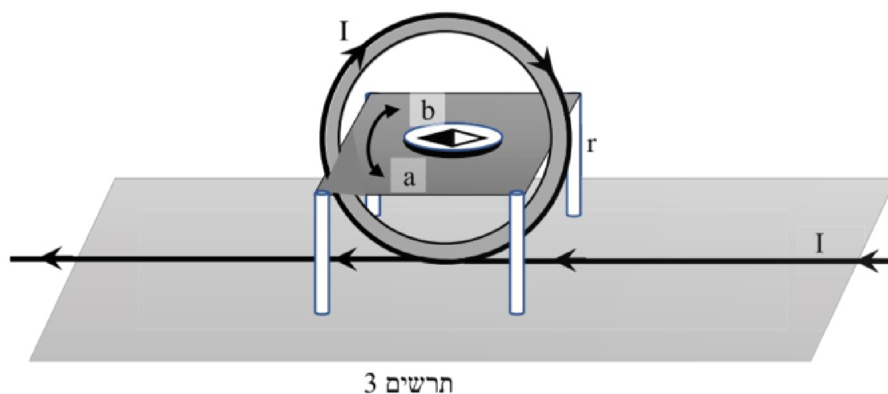
נתון:

$$B_{E_H} = 3 \cdot 10^{-5} T$$
$$\theta = 21.8°$$

ג. חשבו את BI – השדה המגנטי שיוצר הזרם החשמלי שבתיל.

ד. בסעיף זה אפשר להיעזר בחישוב היחס $\frac{I}{r}$.

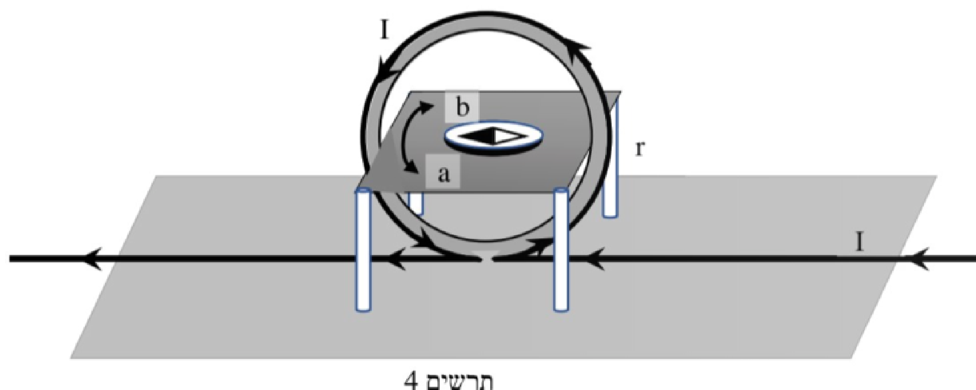
(1) מלפפים את התיל סביב חישוק מעגלי כך שנוספת לתיל הארוך כריכה מעגלית אחת ברדיוס r. עוצמת הזרם החשמלי נותרה I, וכיוונו מתואר בעזרת החצים שבתרשים. ראו בתרשים 3:



תרשים 3

חשבו את גודלה של זווית הסטייה מהצפון, וציינו את כיוון הסטייה לכיוון (a) או לכיוון (b).

(2) הופכים את כיוון הכריכה המעגלית. ראו בתרשים 4:

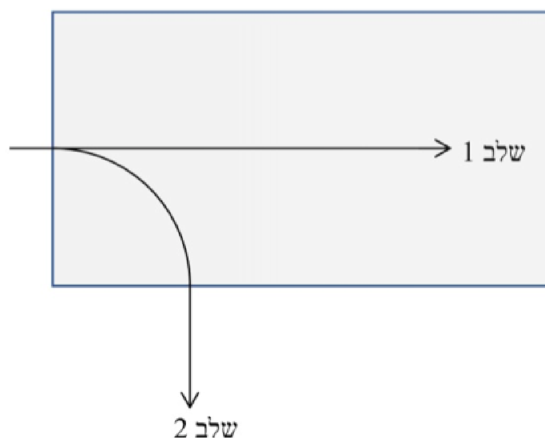


תרשים 4

מהו כיוון הסטייה כעת, לכיוון (a) או לכיוון (b)? נמקו.

5. אלומת חלקיקים בעלי מסה m ומטען חיובי q נכנסת לאזור מלבני ששוררים בו שדה חשמלי E ושדה מגנטי B. החלקיקים נעים בהשפעת הכוח החשמלי והכוח המגנטי בלבד.

- בשלב 1 החלקיקים נעים בקו ישר.
- בשלב 2 מכבים את אחד השדות. בעקבות כך החלקיקים נעים במסלול מעגלי, ויוצאים מהאזור בניצב לכיוון תנועתם המקורי.



א. מה הכיוון של השדה החשמלי, ומה הכיוון של השדה המגנטי באזור המלבני?

ב. הביעו באמצעות E, B, m, q בלבד את רדיוס המעגל.

ג. הביעו באמצעות E, B, m, q בלבד את משך הזמן שבו נעו החלקיקים בתוך האזור המלבני.

- בשלב 3 מכבים את השדה שפעל, ומפעילים את השדה האחר. לאחר ההחלפה החלקיקים נעים באזור המלבני ויוצאים ממנו.

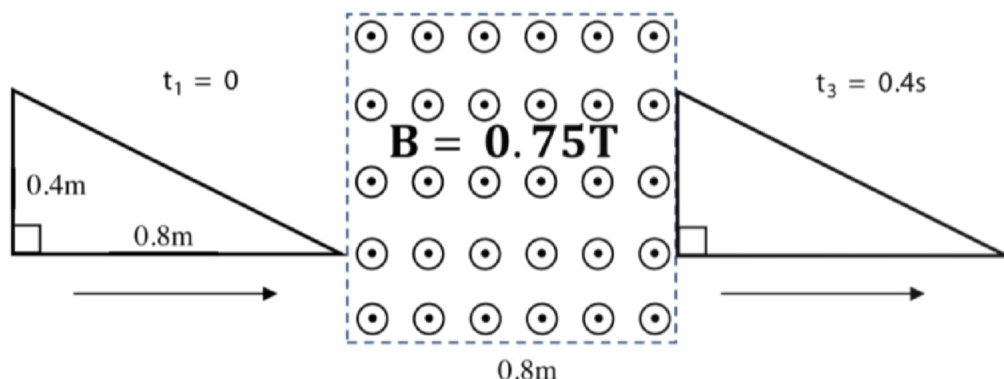
ד. (1) העתיקו את התרשים למחברת והוסיפו לו את מסלול החלקיקים בשלב 3.

(2) מהי צורת המסלול בשלב 3, קשת, פרבולה, היפרבולה, אליפסה, עקומה אקספוננציאלית או אחרת? נמקו.

ה. האם עבודת השדה החשמלי על החלקיקים במהלך תנועתם בשלב 3 שווה לעבודת השדה מגנטי על החלקיקים במהלך תנועתם בשלב 2, גדולה יותר או קטנה יותר? הסבירו.

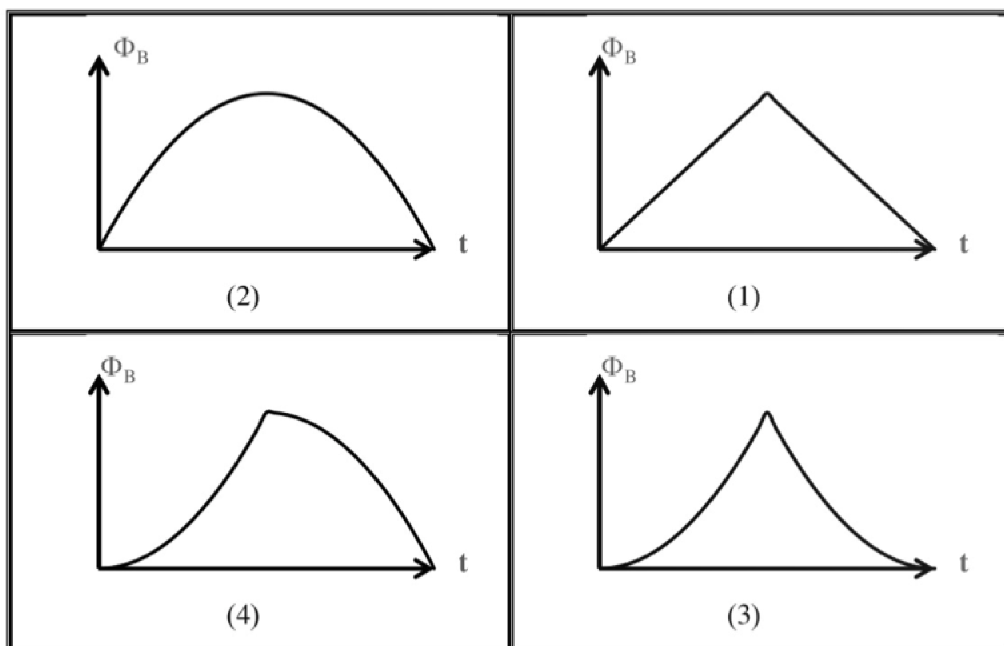
השראה אלקטרומגנטית

6. תיל מוליך מכופף כך שהוא יוצר מסגרת שצורתה משולש ישר זווית, והתנגדותה הכוללת היא 0.1Ω. המשולש נע ימינה **במהירות קבועה**, וברגע $t_1 = 0$ נכנס לאזור מלבני שבו שורר שדה מגנטי אחיד שגודלו $B = 0.75T$ וכיוונו מחוץ לדף. ניצבי המשולש מקבילים לגבולות התחום המלבני, ואורכם $0.8m$ ו-$0.4m$ רוחב התחום המלבני הוא $0.8m$. ברגע $t_2 = 0.2s$ המשולש נמצא בשלמותו בתוך התחום המלבני.

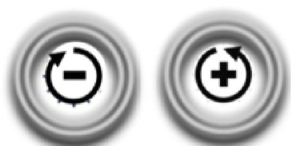


א. חשבו את מהירות המשולש, והביעו את השטף המגנטי דרך המשולש כפונקציה של הזמן, בפרק הזמן $t_1 \le t \le t_2$.

ב. לפניכם הגרפים (4), (3), (2), (1). איזה גרף יכול לתאר את השטף המגנטי דרך המשולש כפונקציה של הזמן, בפרק הזמן $t_1 \le t \le t_3$? נמקו את קביעתכם.



ג. שרטטו גרף מדויק של הזרם שנוצר במשולש כפונקציה של הזמן, כאשר הכיוון החיובי הוא נגד כיוון מחוגי השעון.



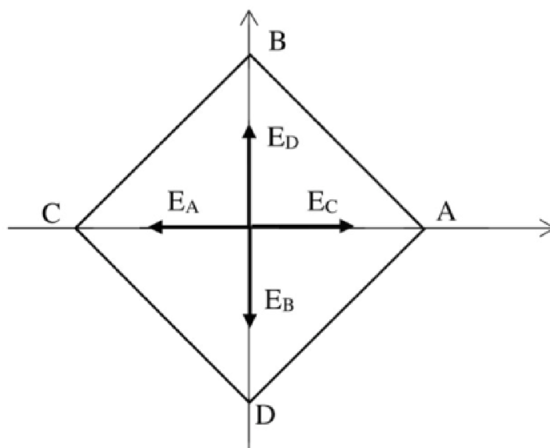
ד. חשבו על פי הגרף או בדרך אחרת את כמות המטען שעברה דרך חתך של התיל בפרק הזמן $t_1 \le t \le t_2$.

ה. (1) מה כיוונו של הכוח החיצוני הדרוש כדי שהמשולש ינוע במהירות קבועה בפרק הזמן $t_1 \le t \le t_2$?

(2) מה כיוונו של הכוח החיצוני הדרוש כדי שהמשולש ינוע במהירות קבועה בפרק הזמן $t_2 \le t \le t_3$?

פתרונות מבחן 13

1. א. השדה החשמלי בראשית הצירים שווה ל–0. הסבר: נשרטט את המערכת ונסמן את השדות שמשרים המטענים. זוגות השדות שיוצרים המטענים שבקודקודים, שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, לכן הם מבטלים זה את זה. לפיכך הסכום של 4 הווקטורים הוא 0.



המשמעות של שדה חשמלי המתאפס בנקודה היא שהכוח החשמלי שיפעל בנקודה זו על גוף קטן הנושא מטען חשמלי יתאפס.

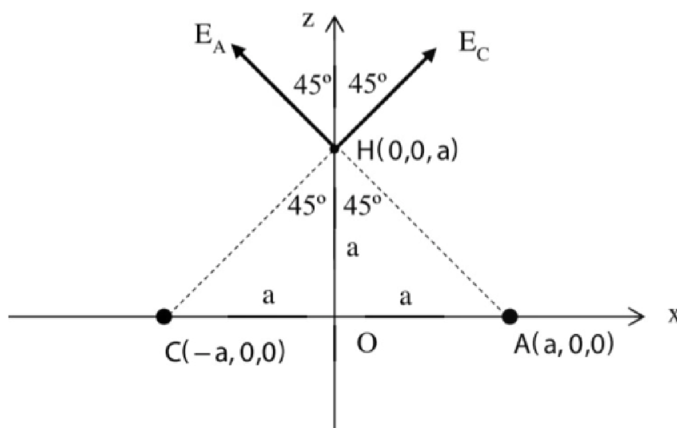
ב. הפוטנציאל בראשית הצירים שונה מ–0. נביע את הפוטנציאל בראשית – VO. נזכור שהפוטנציאל הוא גודל סקלרי על כן עלינו לחבר 4 איברים זהים:

$$V_O = \frac{k\frac{1}{4}Q}{a}\cdot 4 = \frac{kQ}{a}$$

ג. (1) נביע את השדה שמשרה כל אחד מ–4 המטענים (בתרשים משורטטים רק המטענים ב–A וב–C והשדות שהם משרים). הזוויות הן של 45º כי המשולשים ΔAOH ו–ΔCOH הם ישרי זווית ושווי שוקיים. רכיבי ה–x מבטלים זה את זה, כך שנותר לחבר את 4 רכיבי

ה–z . את המרחקים נמצא לפי משפט פיתגורס:

$$\overline{AH}=\overline{CH}=\sqrt{a^2+a^2}=a\sqrt{2}$$



$$E_H=E_{A_z}+E_{B_z}+E_{C_z}+E_{D_z}=\frac{k\frac{Q}{4}}{\left(a\sqrt{2}\right)^2}\cdot\cos 45°\cdot 4=\frac{kQ}{2a^2}\cos 45°$$

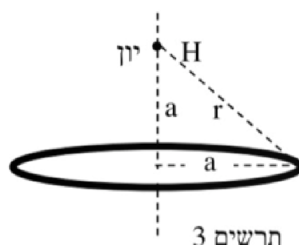
חישבנו את גודלו של השדה. כיוון השדה החשמלי הוא בכיוון החיובי של ציר z.

(2) כיוון הכוח החשמלי הוא למטה לכיוון הראשית, כי הכוח על מטען שלילי מנוגד לכיוון השדה החשמלי. נביע את גודל הכוח:

$$|F|=|qE|=\frac{kqQ}{2a^2}\cos 45°$$

ד. לא יחול שינוי בתשובות. הסבר: מספר האיברים בכל אחד מהחישובים יוכפל פי 2, אך גודלו של כל איבר יקטן פי 2.

ה. אפשר להתייחס אל הטבעת כאל מצולע משוכלל בעל אין סוף קודקודים שבכל אחד מטען, כך שהמטען הכולל שלהם הוא Q. כפי שהסברנו בסעיף הקודם, מספר הקודקודים אינו משפיע על השדה ועל הפוטנציאל לאורך ציר z. נמצא על פי עיקרון זה את הפוטנציאל בנקודות O ו–H:



ראשית נמצא את המרחק בין H לנקודה כלשהי על הטבעת: $r=\sqrt{a^2+a^2}=a\sqrt{2}$.

$$V_O=\frac{kQ}{a}$$
$$V_H=\frac{kQ}{a\sqrt{2}}$$

נזכור שתאוצת היון אינה קבועה, לכן לא נוכל לחשב את המהירות על פי נוסחאות התאוצה הקבועה.
על כן נחשב את המהירות בנקודה O לפי שימור האנרגיה:

$$U_E(O)+E_k(O)=U_E(H)+E_k(H)$$
$$(-e)\cdot V_O(O)+\frac{1}{2}mv_O{}^2=(-e)\cdot V_E(H)+\frac{1}{2}mv_E{}^2$$
$$(-e)\frac{kQ}{a}+\frac{1}{2}mv_O{}^2=(-e)\frac{kQ}{a\sqrt{2}}+0$$
$$v_O{}^2=\frac{2kQ}{m\cdot a}-\frac{2keQ}{m\cdot a\sqrt{2}}$$
$$v_O=\sqrt{\frac{keQ}{ma}\left(2-\sqrt{2}\right)}=\sqrt{\frac{9\cdot10^9\cdot1.6\cdot10^{-19}\cdot5\cdot10^{-7}}{1.32\cdot10^{-25}\cdot0.02}\left(2-\sqrt{2}\right)}$$
$$v_O=4\cdot10^5\,\frac{m}{s}$$

2. א. נציב את הנתונים בנוסחת הפוטנציאל מחוץ לגוף כדורי, ונחשב את מטען הגוף:

$$V = \frac{kq}{r} \Rightarrow r = \frac{kq}{V}$$

$$r_2 - r_1 = \frac{kq}{V_2} - \frac{kq}{V_1}$$

$$0.05 = 9 \cdot 10^9 q\left(\frac{1}{-7{,}200} - \frac{1}{-9{,}000}\right) = -250{,}000q$$

$$q = -2 \cdot 10^{-7} C$$

ב. כדי להימלט למרחק אין סופי מהכדור יש להתגבר על בור הפוטנציאל. האנרגיה הקינטית המינימלית צריכה להיות שווה לאנרגיה הפוטנציאלית בערכה המוחלט:

$$\frac{1}{2} m v_1^2 = |qV|$$

$$v_1^2 = \frac{2|qV|}{m} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 9{,}000}{6.44 \cdot 10^{-27}} = 8.944 \cdot 10^{11}$$

$$v_1 = 946{,}000 \frac{m}{s}$$

ג. המהירויות שוות: v2=v1, מכיוון שהשדה החשמלי הוא שדה משמר שעבודתו אינה תלוויה במסלול. או לחלופין ־ האנרגיה הקינטית אינה תלויה בכיוון המהירות אלא בגודלה בלבד.

ד. (1) הפוטנציאל בנקודה A יישאר ללא שינוי כי הפוטנציאל **מחוץ** לגוף כדורי תלוי במרחק למרכז הכדור שאינו משתנה.

(2) הפוטנציאל בנקודה **הפנימית** M יקטן, כי ככל שרדיוס הגוף גדל, הפוטנציאל קטן בכל נפח הכדור.

3. א. המדידה היא מדידה 1. נימוק: כשהמגע הנייד התלכד עם הקצה M ההתנגדות השקולה של המעגל היא מינימלית, מכאן שהזרם מרבי.

ב. אפשר לקבל את הנקודה אם מנתקים את המגע הנייד ומתקבל מעגל לא סגור.

ג. המתח הקטן ביותר האפשרי – 9V – מתקבל כשהמגע הנייד מחובר לקצה N, וסכום המתחים שעל הפס MN ועל "הרכיב X" שווה למתח המקור:

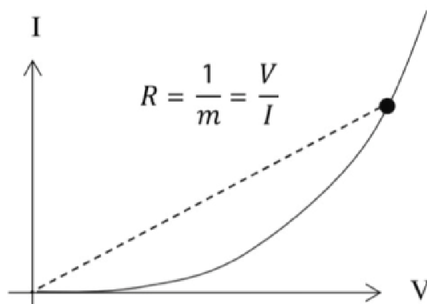
$$V_{MN} + Vx = 24$$
$$V_{MN} + 9 = 24$$
$$V_{MN} = 15V$$

לפי הטבלה, הזרם במצב זה הוא 0.25A. נמצא את ההתנגדות:

$$R_{MN} = \frac{V_{MN}}{I} = \frac{15}{0.25} = 60\Omega$$

ד. יש לחבר את הקצה השני לנקודה N. הסבר: המעגל שנוצר הוא פוטנציומטר. הזזת המגע הנייד מ-M ל-N תשנה את המתח על הרכיב בתחום מ-0 ועד למתח המקור.

ה. ההתנגדות של "הרכיב X" יורדת עם עליית המתח. הסבר: צורת הגרף שהתקבל (האופיין) קעורה כלפי מעלה. ההתנגדות בנקודה שעל האופיין מוגדרת לפי חוק אוהם: $R = \frac{V}{I}$, כלומר ההתנגדות היא ההופכי לשיפוע המיתר המחבר את הנקודה לראשית (ולא ההופכי לשיפוע של המשיק לגרף בנקודה). ראו בתרשים:

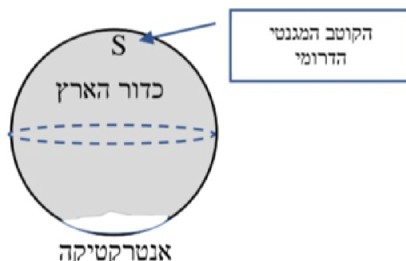


ו. במתחים נמוכים מ-3 וולט: הרכיב X הוא נתק. הזרם מתאפס על אף שהמתח גדול מ-0.

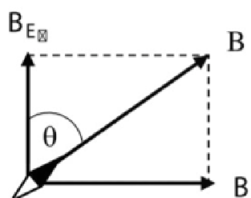
4. א. (1) אם ננוע בעקבות הקוטב הצפוני של מחט המצפן, נגיע לבסוף לקרבת הקוטב הגאוגרפי הצפוני, מכיוון שזו ההגדרה המוסכמת של הקוטב הצפוני של מחט המצפן.

(2) אם ננוע בעקבות הקוטב הצפוני של מחט המצפן נגיע לבסוף לקוטב המגנטי הדרומי של כדור הארץ הנמצא בקרבת הקוטב הגאוגרפי הצפוני.

ב. המחט סוטה לכיוון (b). הסבר: לפי כלל הבורג, כיוון השדה המגנטי בסביבת המצפן, שנוצר עקב הזרם החשמלי בתיל, מאונך לצפון, לכיוון מזרח. מחט המצפן תצביע לכיוון השדה המגנטי השקול.



ג. נשרטט תרשים וקטורי של השדות המגנטיים, שמצביעה לכיוון השדה השקול:



לפי התרשים ששרטטנו נחשב את – BI:

$$B_I = B_{E_{||}} \tan\theta = 3\cdot10^{-5}\cdot\tan 21.8° = 1.2\cdot10^{-5}\text{T}$$

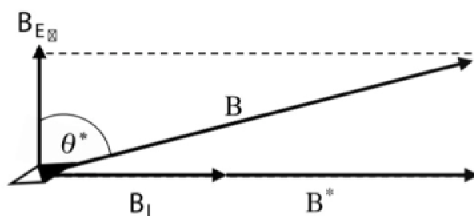
ד. ראשית נכתוב ביטוי ל–BI, ובעזרתו נחשב את היחס $\frac{I}{r}$:

$$B_I = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi\cdot10^{-7} I}{2\pi r} = \frac{2\cdot10^{-7} I}{r}$$

$$\frac{I}{r} = \frac{B_I}{2\cdot10^{-7}} = \frac{1.2\cdot10^{-5}}{2\cdot10^{-7}} = 60\,\frac{A}{m}$$

(1) נסמן ב–*B את השדה המגנטי שיוצר הזרם בכריכה. *B נוסף לשני השדות שבסביבת המצפן וכיוונו מתלכד עם הכיוון של BI. נחשב את גודלו:

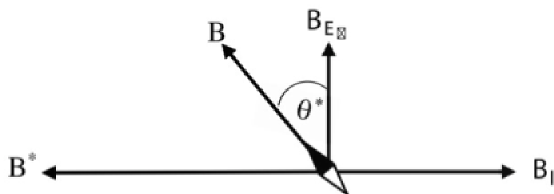
נוסיף את השדה *B לתרשים הווקטורי ונחשב את זווית הסטייה מהצפון:



$$\tan\theta^* = \frac{B_I + B^*}{B_E} = \frac{1.2\cdot10^{-5} + 3.77\cdot10^{-5}}{3\cdot10^{-5}} = 1.66$$

$$\theta = 58.9°$$

(2) המחט תסטה לכיוון (a). הסבר: הפיכת כיוון הכריכה תהפוך את כיוון השדה *B. מכיוון שהשדה *B גדול מ–BI גם כיוון הסטייה יתהפך. נמחיש זאת בשרטוט שלפניכם:



5. א. לפי שלב 2 כיוון הכוח המגנטי על החלקיקים הוא למטה, כיוון המהירות הוא ימינה, ועל פי כלל יד ימין הכיוון של השדה המגנטי יוצא מהדף $\odot$ (נשים לב שמטען החלקיקים חיובי).
בשלב 1 הכיוון של הכוח החשמלי מנוגד לכיוון הכוח המגנטי, כלומר למעלה. לכן כיוון השדה החשמלי הוא למעלה.

ב. נביע את רדיוס המעגל לפי החוק השני של ניוטון:

$$qvB = m\frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

בשלב 1 החלקיקים נעים במהירות קבועה. לפי החוק הראשון של ניוטון, הכוח החשמלי והכוח המגנטי שווים בגודלם.

$$qvB = qE$$

$$v = \frac{E}{B}$$

נציב בביטוי לרדיוס ונקבל את הביטוי המבוקש:

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{m\,{}^{E}\!/_{B}}{qB}$$

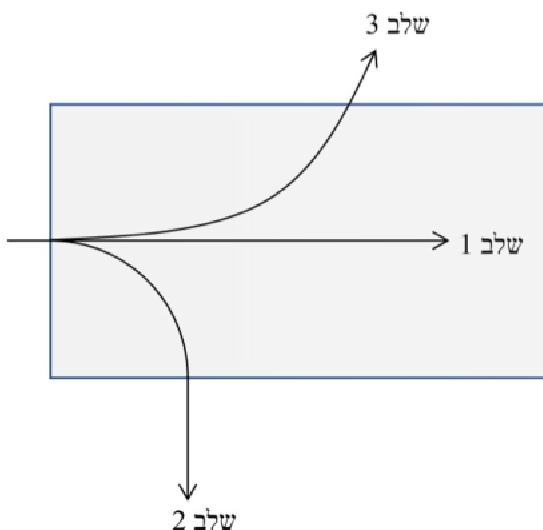
$$R = \frac{mE}{qB^2}$$

ג. משך הזמן הוא רבע זמן מחזור:

$$\Delta t = \frac{1}{4}T = \frac{1}{4}\cdot\frac{2\pi R}{v} = \frac{\pi}{2v}\cdot\frac{mv}{qB}$$

$$\Delta t = \frac{\pi m}{2qB}$$

ד. (2+1) נוסיף לתרשים את מסלול החלקיקים בשלב 3.

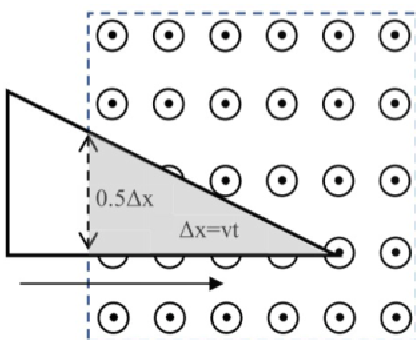


הסבר: החלקיקים נעים בהשפעת כוח קבוע שכיוונו מאונך למהירות ההתחלתית. המסלול דומה למסלול של זריקה אופקית אבל כלפי מעלה, כלומר פרבולה "צוחקת".

ה. עבודת הכוח החשמלי על החלקיקים בשלב 3 גדולה מעבודת הכוח המגנטי על החלקיקים בשלב 2. הסבר: עבודת השדה החשמלי היא חיובית שכן מהירות החלקיקים הולכת גדלה. עבודת הכוח החשמלי היא 0, כי הכוח מאונך למהירות.

6. א. המשולש עובר העתק של 0.8m במשך 0.2s, לכן מהירותו היא $v=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{0.8}{0.2}=4\frac{m}{s}$. נשרטט את המשולש לאחר שעבר העתק Δx, ונביע את השטף המגנטי דרך חלק המשולש ש S הנמצא בתוך השדה, כפונקציה של הזמן. נוסיף כי היחס בין ניצבי המשולש ששטחו S הנמצא בתוך השדה נשמר.

נציב את הערכים הנתונים:



$$S=\frac{1}{2}\Delta x\cdot\Delta y=\frac{1}{2}vt\cdot\frac{1}{2}vt=\frac{1}{4}v^2t^2$$

$$\Phi_B=B\cdot S=\frac{1}{4}Bv^2t^2$$

$$\Phi_B=\frac{1}{4}Bv^2t^2=\frac{1}{4}\cdot0.75\cdot4^2\cdot t^2=3t^2$$

$$\Phi_B=3t^2$$

ב. הגרף הנכון הוא גרף (4). נימוק: בפרק הזמן $t_1\le t\le t_2$ הביטוי שקיבלנו הוא פונקציה ריבועית שהגרף המתאים לה הוא פרבולה עם מינימום. בפרק הזמן $t_2\le t\le t_3$ הביטוי הוא השטף דרך המשולש בשלמותו פחות השטף $\Phi_B=3t^2$ דרך חלק המשולש שיצא מתחום השדה המגנטי:

$$\Phi_B(t_2\le t\le t_3)=\Phi_B(max)-3t^2$$
$$=\frac{1}{2}\cdot0.8\cdot0.4\cdot0.75-3t^2=0.12-3t^2.$$

לכן בקטע זה הגרף הוא פרבולה עם מקסימום.

ג. ראשית נמצא את הכא"מ המושרה לפי חוק פארדיי – נגזור את הביטוי לפי הזמן ונוסיף סימן מינוס:

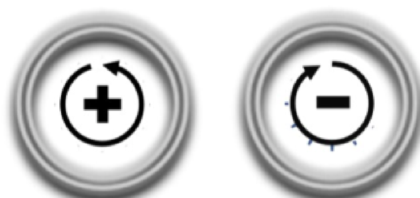
$$\begin{cases} t_1 \le t \le t_2 & \varepsilon = -\dfrac{d\Phi_B}{dt} = -6t \\ t_2 \le t \le t_3 & \varepsilon = -\dfrac{d\Phi_B}{dt} = 6\Delta t \quad (\Delta t = t - t_2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_1 \le t \le t_2 & I = \dfrac{\varepsilon}{R} = \dfrac{-6t}{0.1} = -60t \\ t_2 \le t \le t_3 & I = \dfrac{\varepsilon}{R} = \dfrac{6t}{0.1} = 60\Delta t \end{cases}$$

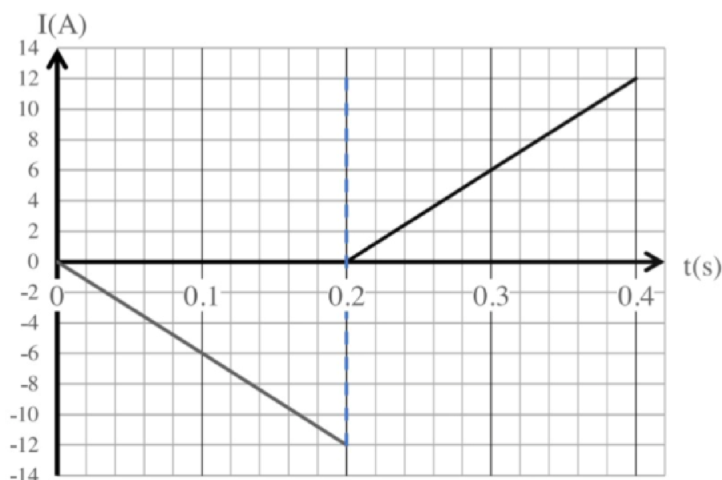
נתעלם מסימני הזרם שהתקבלו, ונקבע את הכיוונים לפי חוק לנץ:

בפרק הזמן $t_1 \le t \le t_2$ השטף הולך וגדל עם הזמן, לכן הזרם המושרה ייצור שדה מגנטי מושרה שכיוונו מנוגד לשדה המקורי, כלומר לתוך הדף – ✕. לפי כלל יד ימין כיוון הזרם יהיה עם כיוון מחוגי השעון.

בפרק הזמן $t_2 \le t \le t_3$ השטף הולך וקטן עם הזמן, לכן הזרם המושרה ייצור שדה מגנטי מושרה שכיוונו מנוגד לשדה המקורי, כלומר מחוץ לדף – ⊙. לפי כלל יד ימין כיוון הזרם יהיה נגד כיוון מחוגי השעון.



נשרטט את הגרף:



ד. כמות המטען מיוצגת על ידי השטח הכלוא בין הגרף לבין הציר האופקי (השטח המודגש בתרשים).

$$\Delta q = \frac{1}{2} \cdot 0.2 \cdot 12 = 1.2C$$

ה. (1+2) בשני השלבים כיוונו של הכוח החיצוני הדרוש כדי שהמשולש ינוע במהירות קבועה הוא ימינה. הסבר: המסגרת המשולשת נמצאת בשדה מגנטי וזורם בה זרם חשמלי. לכן פועל על המסגרת כוח מגנטי שכיוונו שמאלה. לכן דרוש כוח חיצוני שכוונו ימינה כדי לאזן את הכוח המגנטי. נראה בשתי דרכים שכיוון הכוח מגנטי הפועל על המסגרת הוא שמאלה:

- לפי חוק לנץ: בשני השלבים כיוון הכוח המגנטי הפועל על המשולש הוא שמאלה נגד כיוון התנועה, כי התנועה ימינה היא ההפרעה שיוצרת שינוי בשטף המגנטי שבעקבותיו נוצר כא"מ מושרה והגורם זרם מושרה. הכוח המגנטי הפועל על המשולש מנוגד להפרעה המקורית שיצרה אותו, כלומר לכיוון שמאלה.

נמחיש את ההסבר בעזרת תרשים:



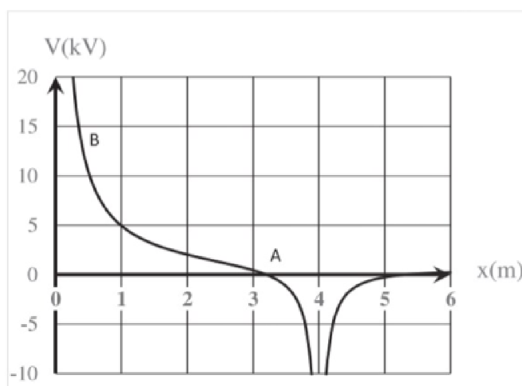
- הסבר לפי שיקולי אנרגיה: הכוח המגנטי פועל נגד כיוון התנועה, שאם לא כן תנועת המשולש הייתה ממשיכה לנוע ללא הפסק, ואף מאיצה ללא צורך בכוח חיצוני. כך היה נוצר זרם תמידי במשולש וחום, בסתירה לחוק שימור האנרגיה.

הערה: חוק לנץ עצמו הוא תולדה של חוק שימור האנרגיה, על כן שני ההסברים הם למעשה היינו הך.

מבחן 14

1. שני כדורים זעירים טעונים q_1, q_2 נמצאים על ציר ה– x. לפניכם גרף של הפוטנציאל ששני הכדורים יוצרים לאורך ציר ה–x. ידוע ש–q_1 חיובי וניצב בראשית:

א. היכן על הציר ניצב q_2?



נתון בנקודה A: $x=3.2m$. והפוטנציאל מתאפס.

ב. חשבו את היחס $\frac{q_2}{q_1}$

נתון גם שהגרף עובר בנקודה $B(2m,1.35kV)$.

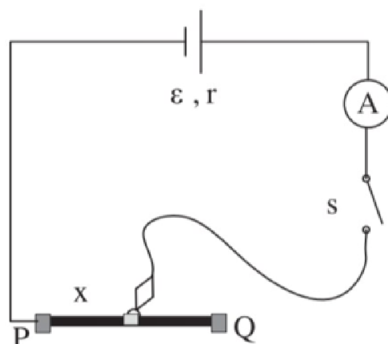
ג. חשבו את המטענים q_1, q_2.

ד. טיפת שמן שמסתה $m=6\cdot10^{-6}Kg$ ומטענה השלילי הוא $Q=-2\cdot10^{-8}C$ מתחילה לנוע ממנוחה לאורך ציר x בקטע שבין הנקודות A ו–B.

(1) האם הטיפה נעה מ–A ל–B או מ–B ל–A?

(2) חשבו את המהירות שאליה הגיעה הטיפה בסוף הקטע.

2. דנה מתכוננת למבחן מעבדה בפיזיקה. היא מרכיבה מעגל הכולל נגד משתנה PQ, סוללה, מפסק ואמפרמטר. ההתנגדויות של תילי ההולכה והאמפרמטר זניחות.



דנה סוגרת את המפסק וכותבת את קריאת האמפרמטר:

- כאשר המגע הנייד מחובר לקצה P האמפרמטר מראה זרם של 1.5A.
- כאשר המגע הנייד מחובר לקצה Q האמפרמטר מראה זרם של 0.3A.
- ההתנגדות המרבית של הנגד המשתנה היא $R_{PQ} = 24\Omega$.

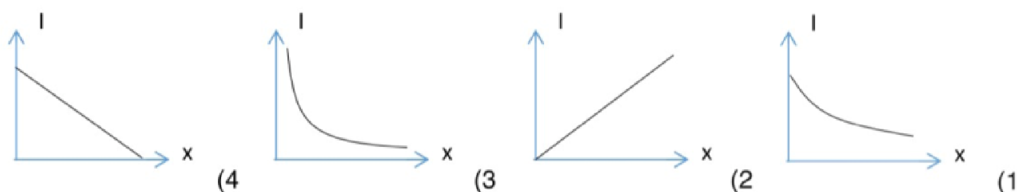
א. מצאו את כא"מ הסוללה ואת התנגדותה הפנימית.

ב. חשבו את מתח ההדקים של הסוללה כאשר המגע הנייד מחובר לאמצע PQ.

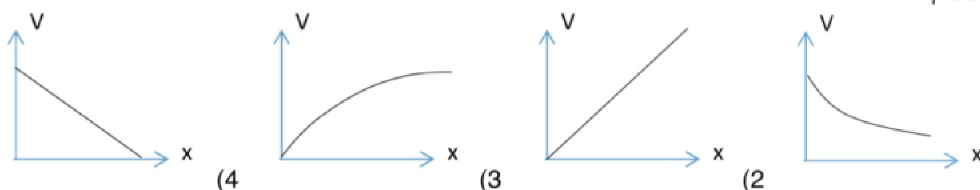
ג. מה יהיה מתח ההדקים של הסוללה בשעה שהמפסק פתוח?

נסמן את המרחק בין המגע הנייד לקצה P ב–x.

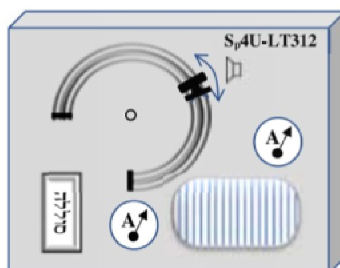
ד. איזה גרף מהגרפים הבאים יכול לתאר את הזרם שמורה האמפרמטר כפונקציה של x? נמקו.



ה. איזה גרף מהגרפים הבאים יכול לתאר את מתח ההדקים של הסוללה כפונקציה של x? נמקו.

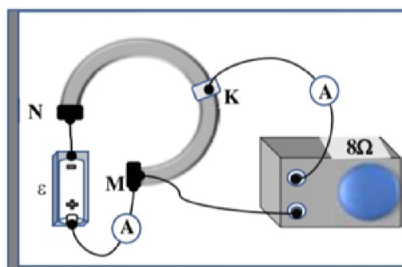


3. תום התלמיד אוהב לפרק ולחקור מכשירי חשמל ישנים. הוא מצא קופסה הכוללת רמקול, סוללה וידית הנעה לאורך קשת של שלושה רבעים של המעגל. הזזת הידית משנה את עוצמת הקול שמשמיע הרמקול. בקופסה מותקנים שני מדי זרם המציגים את הזרם שזורם ברמקול ואת הזרם שעובר בסוללה. ראו בתרשים 1:



תרשים 1

תום הסקרן מסיר את הלוח המכסה את הקופסה, וחוקר את המבנה הפנימי שלה כמתואר בתרשים 2. הדקי הסוללה מתחברים ל-N ־ M, קצותיו של נגד אחיד וארוך, שצורתו קשת של שלושה רבעים של המעגל. הדקי הרמקול שהתנגדותו 8Ω מחוברים לנגד הקשתי, הדק אחד מחובר לקצה M, וההדק האחר מחובר למגע נייד K, שנע לאורך הקשת באמצעות הידית. ערכי הזרם שזורם ברמקול משתנים בעקבות הזזת המגע הנייד. הזרם המינימלי שזורם ברמקול הוא $I_{min} = 0$ והזרם המרבי שזורם ברמקול הוא $I_{max} = 2A$. ההתנגדות הפנימית של הסוללה זניחה, וכך גם ההתנגדויות של התילים ומדי הזרם.



תרשים 2

א. מה צריך להיות מקומו של המגע הנייד K כדי שהזרם הזורם ברמקול יתאפס? בחרו באפשרות הנכונה, ונמקו את בחירתכם.

(1) צמוד לקצה M.

(2) צמוד לקצה N.

(3) באמצע הקשת MN.

ב. מה צריך להיות מקומו של המגע הנייד K כדי שהזרם הזורם ברמקול יהיה מרבי? בחרו באפשרות הנכונה, ונמקו את בחירתכם.

(1) צמוד לקצה M.

(2) צמוד לקצה N.

(3) באמצע הקשת MN.

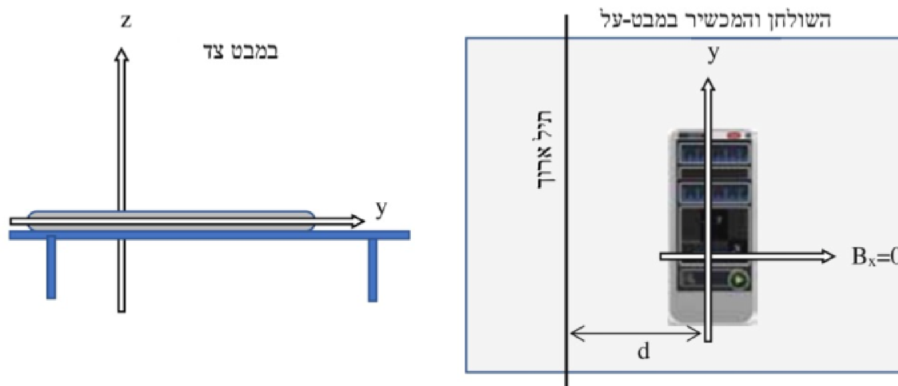
ג. מצאו את כא"מ הסוללה ε.

תום ממקם את המגע הנייד K כך שהזרם הזורם ברמקול הוא 0.75A. במצב זה הזרם דרך הסוללה הוא 1.25A.

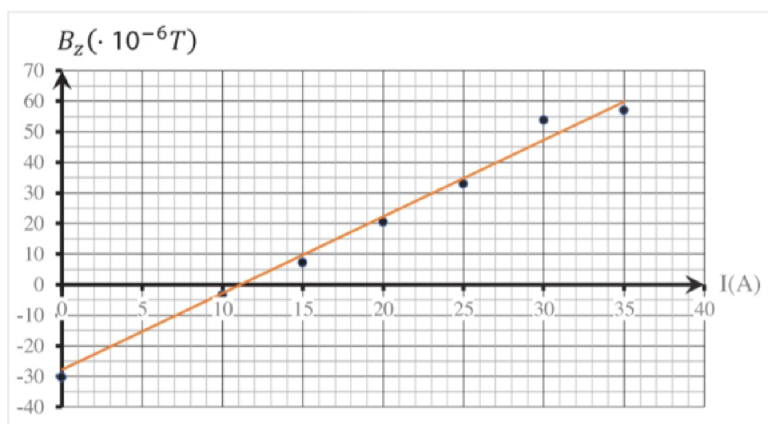
ד. חשבו את ההתנגדות של הנגד הקשתי כולו – R_{MN}.

ה. חשבו את מיקום המגע הנייד K. הביעו את תשובתכם במעלות קשת.

4. מכשיר הטלפון החכם מכיל חיישנים שהופכים אותו למכשיר מדידה משוכלל. אחד החיישנים המרכזיים הוא "מד הטסלה" המודד את השדה המגנטי ורכיביו: B_x, B_y, B_z. ציר x מקביל לרוחב המכשיר, ציר y מקביל לאורך המכשיר וציר z מאונך למישור המכשיר, כך שהחיישן נמצא בראשית הצירים. לפניכם תוצאות שקיבלו תלמידי י"ב בניסוי למדידת הפרמיאביליות של הריק – μ_0.
במהלך הניסוי המכשיר מונח על שולחן אופקי, ציר z פונה אנכית למעלה. מסובבים את המכשיר בלי להרים אותו מהשולחן, כך שרכיב ה-x של השדה מתאפס. במצב זה מניחים על השולחן תיל ארוך נושא זרם מקביל לציר y במרחק d מהחיישן. ראו בתרשים במבט-על ובמבט צד.



א. ללא קשר לתוצאות הניסוי, פתחו ביטוי אלגברי של הרכיב האנכי של השדה המגנטי בסביבת החיישן Bz כפונקציה של הזרם בתיל I , d ו- μ_0.
התלמידים שינו את הזרם בתיל וכתבו את קריאת המכשיר המתאימה. במהלך הניסוי מכשיר הטלפון והתיל לא זזו ממקומם. הגרף שלהלן הוא הגרף המסכם את תוצאות הניסוי.



ב. מצאו על פי הגרף את הרכיב האנכי של השדה המגנטי של כדור הארץ. מה כיוונו?

ג. חשבו את שיפוע הגרף.

ד. מה כיוון הזרם בתיל?

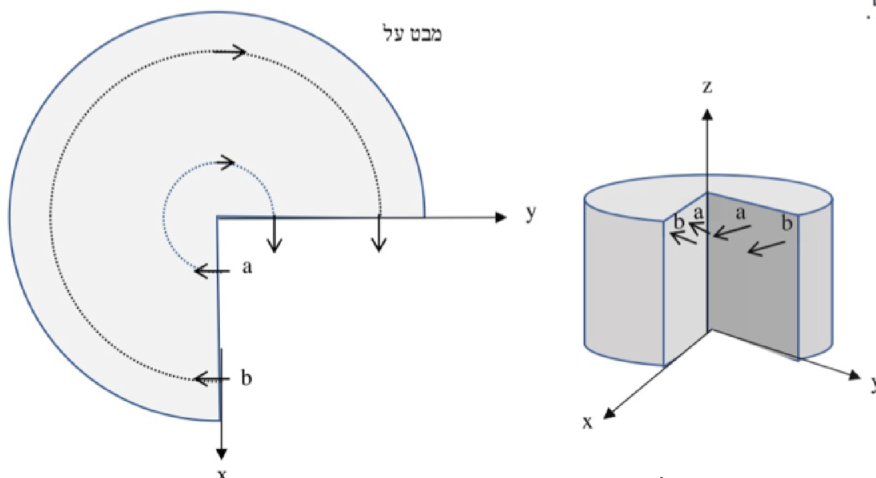
ה. נתון $d = 0.08m$ חשבו את הפרמיאביליות של הריק – μ_0.

ו. הפיזיקאי ג'יימס קלרק מקסוול הוכיח שהשדה המגנטי והשדה החשמלי שלובים זה בזה, ויכולים להתפשט במרחב כגלים. גלים אלו נקראים גלים אלקטרומגנטיים. מקסוול חישב שמהירותם היא:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

כאשר $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$ הוא המקדם הדיאלקטרי של הריק (k הקבוע האלקטרוסטטי). התוצאה שקיבל מקסוול שווה בקרוב למהירות האור– c, ובכך למעשה הראה מקסוול שהאור הוא גלים אלקטרומגנטיים. הראו שהמהירות v שלעיל שווה למהירות האור c.

5. שני חלקיקים זהים, a, b, שמסתם m ומטענם חיובי – q, נכנסים בו בזמן לתחום שצורתו שלושה רבעים של גליל. בכל נפח התחום שוררים שדה מגנטי אחיד B וריק. החלקיקים נעים במסלולים מעגליים בעלי רדיוסים Ra ו– Rb, ויוצאים מהתחום לאחר שעברו מסלול של שלושה רבעים של המעגל.



האינטראקציה בין שני החלקיקים זניחה.

נתון: $Rb = 3Ra$. הניחו שכוח הכובד הפועל על החלקיקים זניח.

א. מה כיוון השדה המגנטי בתחום?

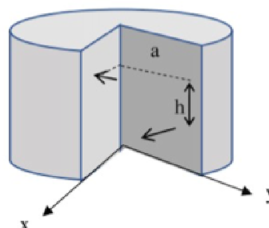
ב. האם שני החלקיקים יצאו בו בזמן מהתחום? אם כן נמקו. אם לא, ציינו איזה חלקיק יצא קודם והביעו את היחס בין שני פרקי הזמן שבו נעו שני החלקיקים בתחום.

ג.

(1) האם שני החלקיקים נכנסו לתחום באותה המהירות? אם כן נמקו. אם לא, הביעו את היחס בין המהירויות.

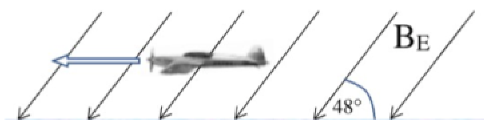
(2) האם שני החלקיקים יצאו מהתחום באותה המהירות? אם כן נמקו. אם לא, הביעו את היחס בין המהירויות.

ד. חלקיק זהה נוסף נכנס לתחום. בסעיף זה הניחו שכוח הכובד הפועל על החלקיק אינו זניח. הביעו באמצעות B, m, q ו– g את הפרש הגבהים – h בין נקודת הכניסה לתחום לבין נקודת היציאה.



6. פעלולנית מטיסה מטוס קל בשמי ישראל. גוף המטוס עשוי מחומר מוליך ומוטת כנפיו 12 מטרים. עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ היא 42 מיקרו-טסלה - $|B_E| = 42 \cdot 10^{-6} T$ וכיוונו בזווית של 48° מתחת לאופק.

א. המטוס טס צפונה במקביל לקרקע במהירות של $160\frac{m}{s}$.

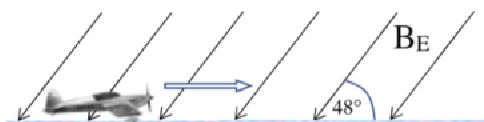


1) חשבו את הכא"מ שנוצר לאורך כנפי המטוס מקצה לקצה.

2) בקצה של איזו כנף מצטבר מטען חיובי, בקצה כנף שמאל (הקרובה אלינו) או בקצה כנף ימין? מה המשמעות הפיזיקלית של הביטוי "מצטבר מטען חיובי".

3) האם מתקיימת זרימה של אלקטרונים מקצה לקצה במהלך הטיסה?

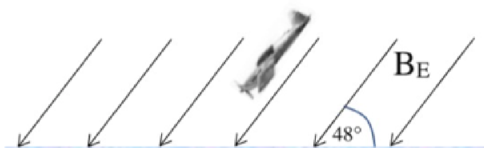
ב. המטוס מאיץ על מסלול ההמראה בכיוון דרום.



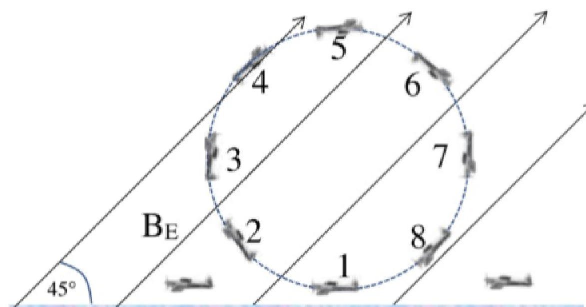
1) בקצה של איזו כנף מצטבר מטען חיובי, בקצה כנף ימין (הקרובה אלינו) או בקצה כנף שמאל?

2) האם מתקיימת זרימה של אלקטרונים מקצה לקצה במהלך ההאצה?

ג. המטוס צולל במקביל לקווי השדה. מהו הכא"מ שנוצר לאורך כנפי המטוס מקצה לקצה?



ד. כיוון השדה המגנטי של כדור הארץ באוסטרליה הוא בזווית של 45° מעל לאופק.
הפעלולנית נבחרה למשלחת אימון באוסטרליה ושם היא מתאמנת בביצוע לולאות מעגליות.
בתרשים שלפניכם מצוינים 8 שלבים במהלך הלולאה הממוספרים מ-1 עד 8.



1) ציינו באיזה מצב או מצבים הכא"מ שנוצר לאורך כנפי המטוס מקצה לקצה הוא מרבי.

2) ציינו באיזה מצב או מצבים הכא"מ שנוצר לאורך כנפי המטוס מתאפס.

פתרונות מבחן 14

1. א. הכדור q_2 נמצא בנקודה $x = 4m$ כי בנקודה זו הפוטנציאל שואף ל: $-\infty$.

ב. הפוטנציאל בנקודה הוא סכום של שני הפוטנציאלים שיוצר כל אחד מהכדורים. נמצא את היחס:

$$V = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2} = 0$$

$$\frac{q_2}{q_1} = -\frac{r_1}{r_2} = -\frac{|3.2-4|}{|3.2-0|} = -\frac{1}{4}$$

ג. נציב את הערכים שמצאנו:

$$V = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2}$$

$$1{,}350 = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_1}{4r_2} = kq_1\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4(4-2)}\right) = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3}{8} \cdot q_1$$

$$q_1 = 4 \cdot 10^{-7} C$$

$$q_2 = -1 \cdot 10^{-7} C$$

ד.

1) הטיפה נעה מ-A ל-B מכיוון שמטענה שלילי וכיוון הכוח החשמלי הפועל עליה הוא במעלה הפוטנציאל.

2) נחשב את מהירות הטיפה לפי שימור האנרגיה:

$$U_E(A) + E_k(A) = U_E(B) + E_k(B)$$

$$QV_A + \frac{1}{2}mv_A{}^2 = QV_B + \frac{1}{2}mv_B{}^2$$

$$0 + 0 = QV_B + \frac{1}{2}mv_B{}^2$$

$$v_B = \sqrt{\frac{2QV_B}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 1{,}350}{6 \cdot 10^{-6}}} = 3\frac{m}{s}$$

2. א. נציב מערכת של שתי משוואות ונקבל את הכא"מ ε ואת ההתנגדות הפנימית r –:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon}{r} = 1.5 \\ \frac{\varepsilon}{r+24} = 0.3 \end{cases}$$

$$1.5r = 0.3(r+24)$$

$$1.2r = 7.2$$

$$r = 6\Omega$$

$$\varepsilon = 9V$$

ב. נחשב את ההתנגדות השקולה ואת הזרם כאשר המגע הנייד מחובר לאמצע PQ :

$$R_t = r + \frac{1}{2}R_{PQ} = 6 + 12 = 18\Omega$$

$$I_t = \frac{\varepsilon}{R_t} = \frac{9}{18} = 0.5A$$

נמצא את מתח ההדקים:

$$V = \varepsilon - Ir = 9 - 0.5 \cdot 6 = 6V$$

ג. מתח ההדקים של הסוללה בשעה שהמפסק פתוח יהיה 9V כי כשהמפסק פתוח הזרם מתאפס, ומתח ההדקים מתלכד עם הכא"מ.

ד. הגרף הנכון הוא גרף 1. נימוק: הגרף נפגש עם הציר האנכי בנקודת זרם הקצר לכן רק גרפים 1 ו–4 אפשריים. כמו כן, הגרף לא נפגש עם ציר x כי הזרם לא מתאפס כל עוד המעגל סגור, לכן גרף 4 אינו מתאים.

ה. הגרף הנכון הוא גרף 3. נימוק: על הגרף לעבור בראשית כי כאשר הנגד החיצוני מתאפס גם מתח ההדקים מתאפס. לכן גרפים 2 ו–3 אפשריים. מתח ההדקים עולה ככל שההתנגדות עולה אבל לא ביחס ישר. $\left(V = \frac{\varepsilon \cdot R_x}{r + R_x}\right)$ לכן גרף 2 אינו מתאים.

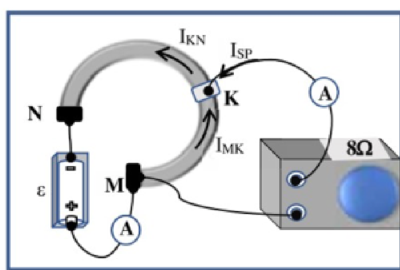
3. א. כדי שהזרם ברמקול יתאפס, על המגע הנייד K להיות צמוד לקצה M, כי במצב זה שני הדקי הרמקול מחוברים לאותה הנקודה, לכן הפרש הפוטנציאלים ביניהם מתאפס.

ב. כדי שהזרם ברמקול יהיה מרבי, על המגע הנייד K להיות צמוד לקצה N, כי במצב זה הדקי הרמקול מחוברים לשני ההדקים של הסוללה, לכן הפרש הפוטנציאלים ביניהם שווה ל-e.

ג. בהתאם לסעיף לעיל, כאשר המגע הנייד K צמוד לקצה N המתח על הרמקול שווה לכא"מ הסוללה. נתונים: הזרם דרך הרמקול – $I_{SP}=2V$ והתנגדותו $R_{SP}=8\Omega$ נציב בחוק אוהם:

$$\varepsilon=V_{MN}=IR=2\cdot 8=16V$$

ד. ראשית נמצא את הזרם. לפי חוק הצומת, סכום הזרמים הנכנסים לצומת שווה לסכום הזרמים היוצאים ממנו. נציב לצומת K:



$$I_{KNt}=I_{MK}+I_{SP}$$
$$1.25=I_{MK}+0.75$$
$$I_{MK}=0.5A$$

כעת נחשב את התנגדות הקשת MK: המתח על הקשת MK שווה למתח על הרמקול, שכן זהו הפרש הפוטנציאלים VMK.

$$V_{MK}=I_{SP}\cdot R_{SP}=0.75\cdot 8=6V$$
$$V_{MK}=I_{MK}\cdot R_{MK}$$
$$6=0.5\cdot R_{MK}$$
$$R_{MK}=12\Omega$$

נחשב גם את התנגדות הקשת KN: סכום המתחים על שני חלקי הנגד הקשתי MK + KN שווה כא"מ הסוללה ε.

$$V_{MK} + V_{KN} = \varepsilon$$
$$6 + V_{KN} = 16$$
$$V_{KN} = 10V$$

נציב בחוק אוהם:

$$V_{KN} = I_{KN} \cdot R_{KN}$$
$$10 = 1.25 \cdot R_{KN}$$
$$R_{KN} = 8\Omega$$

נחבר את התנגדות שני החלקים ונקבל את ההתנגדות של הנגד הקשתי כולו – RMN.

$$R_{MN} = 12 + 8 = 20\Omega$$

ה. נחשב לפי פרופורציה את מיקום המגע הנייד K:

$$\frac{\theta}{270^\circ} = \frac{8}{20}$$
$$\theta = 108^\circ$$

4. א. כיוון השדה המגנטי שיוצר הזרם בתיל B_I הוא עם הכיוון החיובי של ציר z כי הגרף עולה.
הרכיב האנכי של השדה המגנטי של כדור הארץ הוא כלפי הכיוון השלילי של ציר z לפי נקודת החיתוך עם הציר.
השדה המגנטי הוא סכום השדות של הזרם ושל כדור הארץ.

$$\overrightarrow{B_z} = \overrightarrow{B_I} + \overrightarrow{B_{E_z}}$$
$$B_I = \frac{\mu_0 I}{2\text{p} d};$$
$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} - B_{E_z}$$

ב. הרכיב האנכי של השדה המגנטי של כדור הארץ מיוצג על ידי נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האנכי כי בנקודה זו הזרם מתאפס. נתעלם מסימן המינוס כי גודל השדה מתייחס לערך המוחלט בלבד:

$$B_{E_z} = 27 \cdot 10^{-6} T$$

ג. נחשב את שיפוע הגרף לפי שתי נקודות

$$(5{,}15 \cdot 10^{-6})$$
$$S = \frac{\{60-(-15)\} \cdot 10^{-6}}{35-5} = 2.5 \cdot 10^{-6} \frac{T}{A}$$

ד. נחשב את הפרמיאביליות של הריק – μ_0 לפי השיפוע שמצאנו:

$$S = \frac{\mu_0}{2\pi d}$$
$$2.5 \cdot 10^{-6} = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot 0.08}$$
$$\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} T \cdot m \cdot A^{-1}$$

ה. נציב את הערכים שבנוסחאון:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{1.26 \cdot 10^{-6} \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}} = 2.99 \cdot 10^8 \ \frac{m}{s}$$

קיבלנו את ערכה של מהירות האור בריק – c.

5. א. במבט-על החלקיקים נכנסים לתחום כשכיוון מהירותם שמאלה, כיוון הכוח למעלה ולפי כלל יד ימין, כיוון השדה המגנטי בתחום הוא מתוך הדף, כלומר עם הכיוון החיובי של ציר z.

ב. נביע את זמן המחזור:

$$\Sigma F = ma$$

$$\begin{cases} qvB = m\omega^2 R \\ v = \omega R \end{cases}$$

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

זמן המחזור אינו תלוי ברדיוס, לכן שני החלקיקים יצאו מהתחום באותו הזמן לאחר שלושה רבעים של זמן המחזור.

ג. החלקיקים נעים בתנועה מעגלית קצובה. נביע את המהירות:

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

$$v = \omega R = \frac{qBR}{m}$$

1) המהירות תלויה ברדיוס, לכן מהירויות החלקיקים שונות. נביע את היחס:

$$\frac{v_b}{v_a}=\frac{\frac{qBR_b}{m}}{\frac{qBR_a}{m}}=\frac{R_b}{R_a}=3$$

2) שני החלקיקים יצאו מהתחום באותה המהירות שבה הם נכנסו, לכן יחס המהירויות נשמר: $\frac{v_b}{v_a}=3$.

ד. תנועת החלקיק היא שילוב של שתי תנועות בפרק הזמן $\Delta t=\frac{3}{4}T$: תנועה מעגלית קצובה במישור xy ובו בזמן נפילה חופשית בכיוון השלילי של ציר y. נביע את ההעתק האנכי:

$$\Delta z=v_0\cdot\Delta t-\frac{1}{2}g\left(\Delta t\right)^2$$
$$h=-\Delta z=\frac{1}{2}g\left(\frac{3}{4}T\right)^2=\frac{1}{2}g\left(\frac{3}{4}\cdot\frac{2\pi m}{qB}\right)^2=\frac{9\pi^2gm^2}{8q^2B^2}$$

6. א. 1) נחשב את הכא"מ שנוצר לאורך כנפי המטוס:

$$\varepsilon=vl_\perp B_\perp=vlB\sin\alpha=160\cdot12\cdot42\cdot10^{-6}\cdot sin\left(48^\circ\right)=0.06V$$

החישוב לעיל מספיק דיו. כדי להעמיק את ההבנה נסביר את סימני הניצבות שבנוסחה: $l_\perp$ הוא היטל הכנפיים על כיוון המהירות. כאן הכנפיים מאונכות למהירות, ועל כן מוטת הכנפיים שווה להיטל. $B_\perp$ הוא רכיב השדה המאונך למישור המכיל את הכנפיים ואת וקטור המהירות. זהו הרכיב האנכי של השדה המגנטי של כדור הארץ לכן יש לכפול ב: $\sin\alpha$.

2) מטען חיובי מצטבר בקצה כנף שמאל (הקרובה אלינו) לפי כלל יד ימין. המשמעות היא שאלקטרונים נעו משמאל לימין ונותר חוסר באלקטרונים בקצה כנף שמאל.

3) לא מתקיימת זרימה של אלקטרונים מקצה לקצה במהלך הטיסה במהירות קבועה. התהליך של זרימת האלקטרונים נמשך זמן קצר מאוד עד שמצטבר מספיק מטען בקצוות.

ב. 1) מטען חיובי מצטבר בקצה כנף שמאל (הרחוקה מאיתנו) לפי כלל יד ימין.

2) מתקיימת זרימה מתמשכת של אלקטרונים מקצה לקצה במהלך ההאצה. הסבר: ככל שהמהירות עולה כך כמות המטען המצטבר הולכת וגדלה, לכן עוד ועוד אלקטרונים זורמים מקצה לקצה.

ג. הכא"מ שנוצר לאורך כנפי המטוס מקצה לקצה הוא 0, כי וקטורי המהירות והשדה המגנטי מקבילים.

ד. 1) הכא"מ מרבי כאשר כיוון התנועה ניצב לשדה ־ כיוונים 2 ו־6.

2) הכא"מ מתאפס כאשר כיוון התנועה מקביל לשדה ־ כיוונים 4 ו־8.

משרד החינוך

נוסחאות ונתונים בפיזיקה

נספח לכל בחינות הבגרות ברמה של 5 יח"ל

(החל מקיץ תש"ף)

תוכן העניינים

- 2 -

מכניקה

קינמטיקה — תנועה לאורך קו ישר

מהירות רגעית $v = \frac{dx}{dt}$

תאוצה רגעית $a = \frac{dv}{dt}$

מהירות ממוצעת $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

תנועה שוות-תאוצה
$v = v_0 + at$
$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$
$x = x_0 + \frac{v_0 + v}{2}t$
$v^2 = v_0^2 + 2a\,(x - x_0)$

מהירות של B ביחס ל- A $v_{B,A} = v_B - v_A$

דינמיקה

כוח הכבידה $F = mg$

חוק הוק (גודל כוח אלסטי) $F = k\,\Delta\ell$

גודל כוח חיכוך
סטטי $f_s \le \mu_s N$
קינטי $f_k = \mu_k N$

החוק השני של ניוטון $\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$

צפיפות חומר $\rho = \frac{m}{V}$

עבודה, אנרגייה והספק

עבודה הנעשית על גוף הנע לאורך ציר x על ידי כוח F הקבוע בכיוונו $W = \int_{x_1}^{x_2} F_x(x)\,dx$

עבודה של כוח הקבוע בגודלו ובכיוונו
$W = F_x \Delta x = F\cos\theta\,\Delta s$, $\Delta s = |\Delta x|$ כאשר

אנרגייה קינטית $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

אנרגייה פוטנציאלית כובדית (שדה אחיד)
$U_G = mgh$ $\left(U_{G(h=0)} = 0\right)$

אנרגייה פוטנציאלית אלסטית
$U_{sp} = \frac{1}{2}k(\Delta\ell)^2$ (במצב רפוי $U_{sp} = 0$)

משפט עבודה-אנרגייה $W_{\text{כוללת}} = \Delta E_k$

עבודת שקול הכוחות הלא-משמרים
$W_{\text{לא משמרים}} = \Delta E$ (E — אנרגייה מכנית כוללת)

הספק ממוצע $\bar{P} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$

מתקף ותנע

מתקף של כוח משתנה $\vec{J} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t)\,dt$

מתקף של כוח קבוע $\vec{J} = \vec{F}\,\Delta t$

תנע $\vec{p} = m\vec{v}$

נוסחת מתקף-תנע $\vec{J}_{\text{כולל}} = \Delta\vec{p}$

שימור תנע
$m_A\vec{v}_A + m_B\vec{v}_B = m_A\vec{u}_A + m_B\vec{u}_B$

בהתנגשות אלסטית חד-ממדית
$\vec{v}_A - \vec{v}_B = -(\vec{u}_A - \vec{u}_B)$

תנועות מחזוריות

תדירות זוויתית $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

תנועה מעגלית

מהירות זוויתית ממוצעת $\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$

הקשר בין מהירות קווית ומהירות זוויתית

$v = \omega r$

תאוצה רדיאלית (צנטריפטלית)

$a_R = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$

תנועה הרמונית פשוטה

שקול הכוחות בתנועה הרמונית $\Sigma\vec{F} = -c\vec{x}$

$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$

נוסחת מקום-זמן $x = A\cos(\omega t + \phi)$

מהירות $v = -\omega A\sin(\omega t + \phi)$

$v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$

תאוצה $a = -\omega^2 A\cos(\omega t + \phi)$

$a = -\omega^2 x$

זמן המחזור $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$

מטוטלת פשוטה (מתמטית) $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$

כבידה

החוק השלישי של קפלר $\left(\frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_2}\right)^3 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$

גודל כוח הכבידה $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$

אנרגייה פוטנציאלית כובדית

$U_G = -\frac{GMm}{r}$ $\quad \left(U_{G(r\to\infty)} = 0\right)$

אנרגייה של לוויין במסלול מעגלי

קינטית $E_k = \frac{GMm}{2r} = -\frac{U_G}{2}$

כוללת $E = -\frac{GMm}{2r}$

טרנספורמציית שדה הכבידה

$\vec{g}_B = \vec{g}_A - \vec{a}_{B,A}$

אלקטרומגנטיות

אלקטרוסטטיקה

חוק קולון (בריק) $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

שדה חשמלי $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

גודל שדה חשמלי סביב מטען נקודתי

$E = k\frac{q}{r^2}$

גודל שדה חשמלי הנוצר על ידי לוח טעון

$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$ $\quad \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$ $\quad \sigma = \frac{Q}{A}$

פוטנציאל חשמלי סביב מטען נקודתי

$V = k\frac{q}{r}$ $\quad \left(V_{(r\to\infty)} = 0\right)$

אנרגייה פוטנציאלית חשמלית של מטען נקודתי

$U_E = qV$ $\quad \left(U_{E(r\to\infty)} = 0\right)$

אנרגייה של מוליך טעון $U = \frac{1}{2}QV$

פוטנציאל נקודה A ביחס לפוטנציאל נקודה B

(מתח חשמלי) $V_{AB} = V_A - V_B$

השינוי בפוטנציאל $\Delta V = V_B - V_A$

תנועות מחזוריות

תדירות זוויתית $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

תנועה מעגלית

מהירות זוויתית ממוצעת $\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$

הקשר בין מהירות קווית ומהירות זוויתית

$v = \omega r$

תאוצה רדיאלית (צנטריפטלית)

$a_R = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$

תנועה הרמונית פשוטה

שקול הכוחות בתנועה הרמונית $\Sigma\vec{F} = -c\vec{x}$

$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$

נוסחת מקום-זמן $x = A\cos(\omega t + \phi)$

מהירות $v = -\omega A \sin(\omega t + \phi)$

$v = \pm\,\omega\sqrt{A^2 - x^2}$

תאוצה $a = -\omega^2 A\cos(\omega t + \phi)$

$a = -\omega^2 x$

זמן המחזור $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$

מטוטלת פשוטה (מתמטית) $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$

כבידה

החוק השלישי של קפלר $\left(\frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_2}\right)^3 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$

גודל כוח הכבידה $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$

אנרגייה פוטנציאלית כובדית

$U_G = -\frac{GMm}{r}$ $\quad \left(U_{G(r\to\infty)} = 0\right)$

אנרגייה של לוויין במסלול מעגלי

קינטית $E_k = \frac{GMm}{2r} = -\frac{U_G}{2}$

כוללת $E = -\frac{GMm}{2r}$

טרנספורמציית שדה הכבידה

$\vec{g}_B = \vec{g}_A - \vec{a}_{B,A}$

אלקטרומגנטיות

אלקטרוסטטיקה

חוק קולון (בריק) $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

שדה חשמלי $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

גודל שדה חשמלי סביב מטען נקודתי

$E = k\frac{q}{r^2}$

גודל שדה חשמלי הנוצר על ידי לוח טעון

$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$ $\quad \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$ $\quad \sigma = \frac{Q}{A}$

פוטנציאל חשמלי סביב מטען נקודתי

$V = k\frac{q}{r}$ $\quad \left(V_{(r\to\infty)} = 0\right)$

אנרגייה פוטנציאלית חשמלית של מטען נקודתי

$U_E = qV$ $\quad \left(U_{E(r\to\infty)} = 0\right)$

אנרגייה של מוליך טעון $U = \frac{1}{2}QV$

פוטנציאל נקודה A ביחס לפוטנציאל נקודה B

(מתח חשמלי) $V_{AB} = V_A - V_B$

השינוי בפוטנציאל $\Delta V = V_B - V_A$

הקשר בין שדה חשמלי אחיד לבין הפרש פוטנציאלים $E = -\frac{\Delta V}{\Delta x}$

הגדרת הקיבול $C = \frac{Q}{V}$

קיבול של קבל לוחות $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$

גודל השדה החשמלי בין לוחות קבל $E = \frac{V_{AB}}{d} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$

אנרגייה של קבל טעון $U = \frac{1}{2} C V_{AB}^2$

קיבול שקול

של קבלים המחוברים בטור $\frac{1}{C_T} = \sum \frac{1}{C_i}$

של קבלים המחוברים במקביל $C_T = \Sigma C_i$

זרם חשמלי

זרם רגעי $i = \frac{dq}{dt}$

חוק אוהם $V = RI$

התנגדות של תיל $R = \rho \frac{\ell}{A}$

התנגדות שקולה

של נגדים המחוברים בטור $R_T = \Sigma R_i$

של נגדים המחוברים במקביל $\frac{1}{R_T} = \Sigma \frac{1}{R_i}$

עבודת הכוח החשמלי

$W_{A \to B} = V_{AB} I t = q V_{AB}$

הספק חשמלי $P = V_{AB} I$

נצילות $\eta = \frac{P_{eff}}{P_{in}}$

P_{eff} — הספק מנוצל בחלק מהמעגל או בכולו

P_{in} — הספק מושקע

מתח הדקים $V_{ab} = \varepsilon - rI$

ab — הדקי הסוללה

חוקי קירכהוף $\Sigma I = 0$ $\Sigma \varepsilon = \Sigma IR$

מתח בין שתי נקודות במעגל חשמלי

$V_{AB} = \Sigma IR - \Sigma \varepsilon$

זרם רגעי בטעינת קבל או בפריקתו

$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

מתח רגעי בטעינת קבל

$V_C(t) = \varepsilon (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$

מתח רגעי בפריקת קבל $V_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

שדה מגנטי

גודל כוח הפועל על מטען בשדה מגנטי

$F = qvB \sin \alpha$

גודל כוח הפועל על תיל נושא זרם בשדה מגנטי

$F = I\ell B \sin \alpha$

גודל הכוח ליחידת אורך בין שני תילים ארוכים מקבילים $\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d}$

גודל שדה מגנטי סביב תיל ישר וארוך

$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$

במרכז סליל מעגלי דק (בעל רדיוס R ו־ N כריכות) $B = \mu_0 \frac{NI}{2R}$

בתוך סילונית ארוכה (בעלת אורך L ו־ N כריכות) $B = \mu_0 \frac{NI}{L}$

כא"מ מושרה

שטף מגנטי דרך משטח $\phi_B = BA \cos \alpha$

חוק פארדיי — לנץ $\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt}$

כא"מ מושרה בתיל מוליך $\varepsilon = v \ell_{\perp} B_{\perp}$

$\ell_{\perp}$ — היטל התיל על הכיוון הניצב למהירות

$B_{\perp}$ — רכיב השדה המגנטי בכיוון ניצב למישור התנועה

כא"מ מושרה במחולל (בזמן $t = 0$, $\vec{A} \parallel \vec{B}$)

$\varepsilon = NBA\omega \sin(\omega t)$

שנאי אידאלי $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$

קרינה וחומר

אופטיקה גאומטרית

חוק סנל: $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

נוסחת העדשות: $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$

הגדלה קווית: $m = \frac{H_i}{H_o} = \frac{|v|}{|u|}$

עוצמת העדשה: $C = \frac{1}{f}$

גלים מכניים ואלקטרומגנטיים

מהירות גל מחזורי: $v = \lambda f$

חוק השבירה: $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$

גל עומד במיתר שקצותיו קשורים: $\ell = n\frac{\lambda}{2}$

קווי מקסימום ראשיים בהתאבכות משני מקורות (ויותר) שווי־מופע

$\sin\theta_n = \frac{X_n}{L_n} = n\frac{\lambda}{d}$

קווי מינימום בהתאבכות משני מקורות שווי־מופע

$\sin\theta_n = \frac{X_n}{L_n} = (n - \frac{1}{2})\frac{\lambda}{d}$

נוסחת יאנג: $\frac{\Delta X}{L} = \frac{\lambda}{d}$

קווי מקסימום בהתאבכות בסריג עקיפה

$\sin\theta_n = n\frac{\lambda}{d} = nN * \lambda$

קווי צומת בעקיפה בסדק יחיד

$\sin\theta_n = \frac{X_n}{L_n} = n\frac{\lambda}{w}$

אנרגייה של פוטון: $E_{ph} = hf$

$E(eV) = \frac{12400}{\lambda(\text{Å})} = \frac{1240}{\lambda(nm)}$

אפקט פוטואלקטרי: $E_{ph} = E_k + B$

האטום והגרעין

הנחות בוהר: $m_e v_n r_n = n\frac{h}{2\pi}$

$E_{ph} = |E_f - E_i|$

רמות אנרגייה באטום מימן

$E_n = -\frac{R^*}{n^2} \qquad (U_\infty = 0)$

$R^* = \frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = 13.6\ eV$

רדיוסי המסלולים המותרים של האלקטרון באטום המימן

$r_n = r_1 n^2$

$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e k e^2} = 0.529\ \text{Å}$

נוסחת דה־ברויי: $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$

עקרון אי־הוודאות: $\Delta x \Delta p \geqslant \frac{h}{4\pi}$

שקילות מסה-אנרגייה: $\Delta E = \Delta mc^2$

$\Delta E(MeV) = \Delta m(u) \cdot 931.494\ \frac{MeV}{u}$

דעיכה של מקור רדיואקטיבי

λ — קבוע הדעיכה

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

$N = N_0 e^{-\lambda t}$

פעילות של מקור רדיואקטיבי: $R = \lambda N$

זמן מחצית החיים: $T_{1/2} = \frac{\ell n2}{\lambda}$

פעילויות מעבדה

הקירוב הסטנדרטי של אוילר:

$$x_{n+1} \approx x_n + v_n \Delta t$$

$$v_{n+1} \approx v_n + a_n \Delta t$$

הקירוב של טיילור מסדר שני:

$$x_{n+1} \approx x_n + v_n \Delta t + \frac{1}{2} a_n \Delta t^2$$

$$v_{n+1} \approx v_n + \frac{1}{2}(a_n + a_{n+1}) \Delta t$$

קבועים בסיסיים

(ערכי הקבועים רשומים בדיוק נמוך מהדיוק הניסיוני הידוע, ומשמשים לבחינת בגרות.)

שם הקבוע	סימון	יחידות	ערך
קבוע הגרביטציה	G	$N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$	$6.67 \cdot 10^{-11}$
המקדם בחוק קולון	k	$N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$	$9 \cdot 10^9$
מהירות האור בריק	c	$m \cdot s^{-1}$	$3 \cdot 10^8$
פרמיאביליות הריק	μ_0	$T \cdot m \cdot A^{-1}$	$1.257 \cdot 10^{-6}$ $4\pi \cdot 10^{-7}$
דיאלקטריות הריק	ε_0	$C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$	$8.85 \cdot 10^{-12}$
המטען החשמלי היסודי	e	C	$1.60 \cdot 10^{-19}$
קבוע פלאנק	h	$J \cdot s$ $eV \cdot s$	$6.63 \cdot 10^{-34}$ $4.14 \cdot 10^{-15}$
מסת אלקטרון	m_e	kg	$9.11 \cdot 10^{-31}$
מסת פרוטון	m_p	kg	$1.67 \cdot 10^{-27}$
מסת נויטרון	m_n	kg	$1.67 \cdot 10^{-27}$
קבוע אבוגדרו	N_A	mol^{-1}	$6.02 \cdot 10^{23}$

- 7 -

פירוש קיצורי היחידות

סימן	יחידה
m	מטר
Å	אנגסטרם
kg	קילוגרם
g	גרם
u	יחידת מסה אטומית
s	שנייה
h	שעה
N	ניוטון

סימן	יחידה
J	ג'ול
eV	אלקטרון וולט
MeV	מיליון אלקטרון וולט
W	ואט
mol	מול
^{o}C	מעלת צלזיוס
K	קלווין
C	קולון

סימן	יחידה
F	פרד
A	אמפר
Ω	אוהם
V	וולט
T	טסלה
H	הנרי
Hz	הרץ
Pa	פסקל

קשרים בין יחידות

<u>אורך</u>

$1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$

$1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$

<u>אנרגייה</u>

$1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{J}$

<u>מסה</u>

$1\text{u} = 931.494\frac{\text{MeV}}{\text{c}^2} = 1.66 \cdot 10^{-27}\text{kg}$

<u>לחץ</u>

1 אטמוספרה $= 1.01 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

<u>תנע</u>

$1\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 1.87 \cdot 10^{21}\frac{\text{MeV}}{\text{c}}$

<u>מעבר מקלווין למעלות צלזיוס</u>

$t_C = T_K - 273$

נוסחאות מתמטיות

היקף מעגל	$2\pi R$	נפח כדור	$\frac{4}{3}\pi R^3$
שטח עיגול	πR^2	לזוויות קטנות	$\sin\theta \approx tg\theta$
שטח פני כדור	$4\pi R^2$	לזוויות קטנות ברדיאנים	$\sin\theta \approx \theta$

- 7 -

פירוש קיצורי היחידות

סימן	יחידה
m	מטר
Å	אנגסטרם
kg	קילוגרם
g	גרם
u	יחידת מסה אטומית
s	שנייה
h	שעה
N	ניוטון

סימן	יחידה
J	ג'ול
eV	אלקטרון וולט
MeV	מיליון אלקטרון וולט
W	ואט
mol	מול
^{o}C	מעלת צלזיוס
K	קלווין
C	קולון

סימן	יחידה
F	פרד
A	אמפר
Ω	אוהם
V	וולט
T	טסלה
H	הנרי
Hz	הרץ
Pa	פסקל

קשרים בין יחידות

אורך

$$1Å = 10^{-10}m$$

$$1nm = 10^{-9}m$$

אנרגייה

$$1eV = 1.6 \cdot 10^{-19}J$$

מסה

$$1u = 931.494\frac{MeV}{c^2} = 1.66 \cdot 10^{-27}kg$$

לחץ

אטמוספרה $1 = 1.01 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$

תנע

$$1\frac{kg \cdot m}{s} = 1.87 \cdot 10^{21}\frac{MeV}{c}$$

מעבר מקלווין למעלות צלזיוס

$$t_C = T_K - 273$$

נוסחאות מתמטיות

היקף מעגל	$2\pi R$	נפח כדור	$\frac{4}{3}\pi R^3$
שטח עיגול	πR^2	לזוויות קטנות	$\sin\theta \approx tg\theta$
שטח פני כדור	$4\pi R^2$	לזוויות קטנות ברדיאנים	$\sin\theta \approx \theta$

- 8 -

נתונים על אודות השמש והירח

	מסה (kg)	רדיוס (m)	רדיוס מסלול ממוצע סביב כדור הארץ (m)	זמן מחזור (יממות)
שמש	$1.99 \cdot 10^{30}$	$6.96 \cdot 10^{8}$	------	------
ירח	$7.35 \cdot 10^{22}$	$1.74 \cdot 10^{6}$	$3.84 \cdot 10^{8}$	27.3

נתונים הקשורים בכוכבי הלכת

כוכב לכת	מסה $(10^{24}kg)$	רדיוס $(10^{6}m)$	רדיוס מסלול ממוצע $(10^{9}m)$	זמן מחזור (שנים)
כוכב חמה (Mercury)	0.330	2.44	57.9	0.2408
נוגה (Venus)	4.869	6.05	108.2	0.6152
ארץ (Earth)	5.974	6.38	149.6	1.00
מאדים (Mars)	0.642	3.40	227.9	1.881
צדק (Jupiter)	1899.1	71.4	778.3	11.86
שבתאי (Saturn)	568.6	60.0	1427.0	29.46
אורנוס (Uranus)	86.98	26.1	2871.0	84.01
נפטון (Neptun)	103	24.3	4497.1	164.8

המסות של חלקיקים ואטומים אחדים

החלקיק	המסה ב–u	המסה ב– $\frac{MeV}{c^2}$
אלקטרון	0.000549	0.511
פרוטון	1.007276	938.272
נויטרון	1.008665	939.566

האטום	המסה ב–u
מימן ^{1}H	1.007825
דויטריום ^{2}H	2.014101
הליום ^{4}He	4.00260
ליתיום ^{7}Li	7.01601
פחמן ^{12}C	12.00000

- 8 -

נתונים על אודות השמש והירח

	מסה (kg)	רדיוס (m)	רדיוס מסלול ממוצע סביב כדור הארץ (m)	זמן מחזור (יממות)
שמש	$1.99 \cdot 10^{30}$	$6.96 \cdot 10^{8}$	------	------
ירח	$7.35 \cdot 10^{22}$	$1.74 \cdot 10^{6}$	$3.84 \cdot 10^{8}$	27.3

נתונים הקשורים בכוכבי הלכת

כוכב לכת	מסה $(10^{24}kg)$	רדיוס $(10^{6}m)$	רדיוס מסלול ממוצע $(10^{9}m)$	זמן מחזור (שנים)
כוכב חמה (Mercury)	0.330	2.44	57.9	0.2408
נוגה (Venus)	4.869	6.05	108.2	0.6152
ארץ (Earth)	5.974	6.38	149.6	1.00
מאדים (Mars)	0.642	3.40	227.9	1.881
צדק (Jupiter)	1899.1	71.4	778.3	11.86
שבתאי (Saturn)	568.6	60.0	1427.0	29.46
אורנוס (Uranus)	86.98	26.1	2871.0	84.01
נפטון (Neptun)	103	24.3	4497.1	164.8

המסות של חלקיקים ואטומים אחדים

החלקיק	המסה ב–u	המסה ב– $\frac{MeV}{c^2}$
אלקטרון	0.000549	0.511
פרוטון	1.007276	938.272
נויטרון	1.008665	939.566

האטום	המסה ב–u
מימן ^{1}H	1.007825
דויטריום ^{2}H	2.014101
הליום ^{4}He	4.00260
ליתיום ^{7}Li	7.01601
פחמן ^{12}C	12.00000